



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# MODELIZACIÓN 1D, 1D/2D Y 2D DE LA INUNDABILIDAD EN EL MEANDRO DE SANT BOI DE LLOBREGAT MEDIANTE LA NUEVA APLICACIÓN HEC-RAS 5.0

Treball realitzat per:

**Alejandro Delgado Parra**

Dirigit per:

**Ernest Bladé i Castellet**

Màster en:

**Enginyeria de Camins, Canals i Ports**

Barcelona, **Setembre de 2016**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

*“Esta página se ha dejado en blanco intencionadamente”*

## Resumen

El imparable avance de las herramientas informáticas en las últimas décadas ha permitido que los modelos hidráulicos utilizados para el cálculo de inundaciones progresen muy rápidamente. La elevada disponibilidad de información topográfica de gran precisión, y la gran potencia de los nuevos ordenadores, ha supuesto una revolución en este campo, lo que se ha traducido en la transición desde los ya clásicos modelos unidimensionales a los sofisticados modelos bidimensionales, que permiten la obtención de resultados mucho más fiables y realistas.

En el año 2016, Hec-Ras ha lanzado oficialmente al mercado una nueva versión de su software, el cual permite la realización de cálculos hidráulicos usando diversos tipos de modelos. En primer lugar, permite realizar simulaciones mediante el cálculo unidimensional. En segundo lugar, como novedad, es posible desarrollar modelos cuasi bidimensionales (1D/2D), ya que dispone de algoritmos que permiten la combinación de zonas 1D con zonas 2D. Finalmente, esta nueva versión permite el estudio de la inundación mediante el desarrollo de modelos completamente en dos dimensiones.

Este trabajo analiza el estado del arte de la modelización hidráulica y de la nueva herramienta informática Hec-Ras 5.0. Posteriormente, se ha realizado una aplicación práctica con este software. Se ha desarrollado un estudio de inundaciones en el río Llobregat en la zona localizada en el llamado meandro de *Sant Boi de Llobregat*. Mediante esta aplicación práctica, se ha podido entender cómo funciona Hec-Ras 5.0, conocer sus ventajas e inconvenientes, y obtener unos resultados de calados de agua y de velocidades para el área de estudio. También ha permitido analizar mapas de peligrosidad para toda esta zona. Finalmente, se han analizado en profundidad diversos puntos con el propósito de estudiar cómo se comporta cada modelo según la zona donde se encuentra ubicado el punto de análisis.

## Resum

L'imparable desenvolupament de les eines Informàtiques en les darreres dècades ha permès que els models hidràulics utilitzats pel càlcul d'inundacions progressin molt ràpidament. L'elevada disponibilitat d'informació topogràfica de gran precisió, i la gran potència dels nous ordinadors, ha suposat una revolució en aquest camp, el que s'ha traduït en la transició des dels ja clàssics models unidimensionals fins als sofisticats models bidimensionals, que permeten l'obtenció de resultats molt més fiables i realistes.

L'any 2016, Hec-Ras ha llançat oficialment al mercat una nova versió del seu software, el qual permet la realització de càlculs hidràulics fent servir diversos tipus de models. En primer lloc, permet realitzar simulacions mitjançant el càlcul unidimensional. En segon lloc, com a novetat, és possible desenvolupar models quasi bidimensionals (1D / 2D), ja que disposa d'algorismes que permeten la combinació de zones 1D amb zones 2D. Finalment, aquesta nova versió permet l'estudi de la inundació mitjançant el desenvolupament de models completament en dues dimensions.

Aquest treball analitza l'estat de l'art de la modelització hidràulica i de la nova eina informàtica Hec-Ras 5.0. Posteriorment, s'ha realitzat una aplicació pràctica amb aquest software. S'ha desenvolupat un estudi d'inundacions al riu Llobregat a la zona localitzada a l'anomenat meandre de Sant Boi de Llobregat. Mitjançant aquesta aplicació pràctica, s'ha pogut entendre com funciona Hec-Ras 5.0, conèixer els seus avantatges i inconvenients, i obtenir uns resultats de calats d'aigua i velocitats per l'àrea d'estudi. També ha permès analitzar mapes de perillositat per tota aquesta zona. Finalment, s'han analitzat en profunditat diversos punts amb el propòsit d'estudiar com es comporta cada model segons la zona on es troba ubicat el punt d'anàlisi.

## **Abstract**

The advance of computer tools in the last decades has allowed the quickly development of the hydraulic models used for flood assessment calculations. The high availability of accurate topographic information, and the great power of new computers, has paved the way for a revolution in this field. The consequence is a transition from the already classic one-dimensional models to the sophisticated two-dimensional models, which allow obtaining more reliable and realistic results.

In 2016, Hec-Ras has officially launched to the market a new version of its software, which allows the accomplishment of various types of hydraulic calculations through different kinds of models. Firstly, it allows simulations using one-dimensional calculation. Secondly, as a novelty, it is possible to develop quasi-two-dimensional models (1D/2D), because it has algorithms that allow the combination of 1D and 2D areas. Finally, this new version allows the study of the flooding by developing completely two-dimensional models.

This work analyzes the state-of-the-art of the hydraulic modeling and of the new software tool Hec-Ras 5.0. Subsequently, a practical application with this software has been implemented. A flooding study in the river Llobregat in the area located in the so-called Sant Boi de Llobregat meander has been developed. Through this practical application, it has been possible to understand how Hec-Ras 5.0 works, to know its advantages and disadvantages, and to obtain results of water levels and speeds for the study area. It has also allowed us to analyze hazard maps for the entire area. Finally, various points has been deeply analyzed in order to study how each model behaves according to the area where the point of analysis is located.

# Índice

|   |     |
|---|-----|
| Resumen.....  | i   |
| Resum .....   | ii  |
| Abstract .....  | iii |
| Objetivo .....  | 1   |
| Introducción .....  | 2   |
| 1. Modelización hidráulica .....  | 3   |
| 1.1. ¿Qué es la modelización hidráulica? .....  | 3   |
| 1.2. Software disponible para modelización numérica .....   | 4   |
| 1.3. Tipos de modelización hidrodinámica .....  | 5   |
| 1.3.1. Modelos unidimensionales (1D) .....  | 6   |
| 1.3.2. Modelos cuasi 2D (1D/2D) .....   | 6   |
| 1.3.3. Modelos bidimensionales (2D) .....   | 6   |
| 2. Hec-Ras 5.0.....   | 8   |
| 2.1. ¿Qué es Hec-Ras y para qué sirve? .....  | 8   |
| 2.2. Novedades de la versión 5.0 respecto versiones anteriores .....  | 8   |
| 2.3. Ecuaciones y esquema numérico de Hec-Ras 5.0 .....   | 9   |
| 2.4. Tamaño de la malla e intervalo del tiempo de simulación .....  | 9   |
| 2.5. Limitaciones del nuevo programa Hec-Ras 5.0.....   | 10  |
| 2.6. Interfaz de Hec-Ras 5.0, generación de un terreno y de un mapa de<br>rugosidad .....                         | 11  |
| 3. Preparación de los datos necesarios para la simulación mediante Hec-Ras 5.0 en<br>el meandro de Sant Boi ..... | 13  |
| 3.1. Zona de estudio .....  | 13  |
| 3.2. Información de partida y condiciones de contorno para el modelo .....  | 15  |
| 3.3. Pre proceso mediante ArcGis.....   | 17  |
| 3.3.1. Problemas detectados en el modelo digital del terreno del ICC .....  | 18  |
| 3.3.1.1. Dique de defensa de la potabilizadora AGBAR.....   | 19  |
| 3.3.1.2. Carretera BV-2002 y accesos a la carretera C-245 .....   | 20  |
| 3.3.1.3. Pilares de los puentes.....  | 21  |
| 3.3.2. Zonas críticas .....   | 24  |
| 3.3.2.1. Obres de drenaje lateral .....   | 24  |
| 3.3.2.2. Puentes- Estructuras transversales.....  | 26  |
| 3.3.3. Mapa de usos del suelo y Rugosidad .....   | 26  |
| 3.3.4. Creación de las secciones transversales y del cauce del río .....  | 28  |
| 3.3.5. Archivos exportados a Hec-Ras 5.0 .....  | 29  |
| 3.4. Hidrología.....  | 29  |
| 4. Cálculos hidráulicos en el meandro de Sant Boi de Llobregat con Hec-Ras 5.0 ...                                | 32  |
| 4.1. Modelización bidimensional (2D) .....  | 32  |
| 4.1.1. Desarrollo del modelo 2D .....   | 32  |
| 4.1.2. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D.....   | 40  |
| 4.1.2.1. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D sobre el MDT<br>original para T=100 años.....        | 40  |
| 4.1.2.2. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D sobre el MDT<br>tratado para T=100 años .....        | 41  |
| 4.1.3. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D sobre el MDT<br>tratado para T=10 años .....           | 44  |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.1.4. | Problemas encontrados durante el desarrollo del modelo 2D .....  | 47 |
| 4.2.   | Modelización unidimensional (1D) .....   | 47 |
| 4.2.1. | Desarrollo del modelo .....  | 47 |
| 4.2.2. | Resultados de la modelización de los puentes.....  | 51 |
| 4.2.3. | Mapa de calados y velocidades para la simulación 1D (T=100 años).....  | 52 |
| 4.2.4. | Mapa de calados y velocidades para la simulación 1D (T=10 años) .....  | 53 |
| 4.2.5. | Problemas encontrados durante el desarrollo del modelo 1D .....  | 55 |
| 4.3.   | Modelización cuasi 2D (1D/2D) .....  | 55 |
| 4.3.1. | Desarrollo del modelo .....  | 56 |
| 4.3.2. | Mapa de calados y velocidades para 1D/2D (T=100 años).....   | 58 |
| 4.3.3. | Mapa de calados y velocidades 1D/2D (T=10 años) .....  | 59 |
| 4.3.4. | Problemas encontrados durante el desarrollo del modelo 1D/2D .....   | 61 |
| 5.     | Análisis de los resultados entre las diversas tipologías de modelización (1D vs 2D vs 1D/2D) .....                             | 62 |
| 5.1.   | Mapas de peligrosidad.....   | 62 |
| 5.1.1. | Análisis de los mapas de calados discretizados .....   | 65 |
| 5.1.2. | Análisis de los mapas de velocidades discretizados .....   | 66 |
| 5.2.   | Comparación de los niveles de agua entre las diversas tipologías de modelización (2D vs 1D vs 1D/2D) para diversos puntos..... | 66 |
| 5.2.1. | Punto 1- Sección 3611.575.....   | 67 |
| 5.2.2. | Punto 2- Sección 3275.404.....   | 69 |
| 5.2.3. | Punto 3- Sección 3752.607.....   | 71 |
| 5.2.4. | Punto 4- Sección 3445.51 .....   | 73 |
| 5.3.   | Zonas con carácter más urbano inundadas .....  | 75 |
| 5.3.1. | Zona inundada I .....  | 76 |
| 5.3.2. | Zona inundada II .....   | 77 |
| 5.3.3. | Zona inundada III .....  | 78 |
| 6.     | Conclusiones .....   | 79 |
|        | Referencias .....  | 81 |
|        | Anexo I: Planos de ubicación .....   | 83 |
|        | Anexo II: Álbum fotográfico de la zona de estudio.....   | 84 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Condiciones de contorno aplicadas en Hec-Ras 5.0 .....                         | 17 |
| Tabla 2. Información sobre los pilares de los puentes que cruzan la zona de estudio. 23 |    |
| Tabla 3. Usos del suelo y su respectivo número de Manning.....                          | 27 |
| Tabla 4. Caudales punta del río Llobregat .....   | 31 |
| Tabla 5. Parámetros del intervalo de simulación en relación al tamaño de malla .....    | 37 |
| Tabla 6. Calados máximos según el intervalo de tiempo de simulación .....               | 39 |
| Tabla 7. Parámetros del intervalo de simulación para 1D .....                           | 50 |
| Tabla 8. Parámetros del intervalo de simulación para 1D .....                           | 57 |
| Tabla 9. Calados máximos en el punto 1 .....  | 68 |
| Tabla 10. Calados máximos en el punto 2 .....   | 70 |
| Tabla 11. Calados máximos en el punto 3 .....   | 72 |
| Tabla 12. Calados máximos en el punto 4 .....   | 74 |



# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Ventana principal de Hec-Ras y algunos de los botones más relevantes.....   | 11 |
| Figura 2. Creación del terreno en Ras Mapper .....  | 12 |
| Figura 3. Creación del mapa de rugosidad en Ras Mapper.....   | 12 |
| Figura 4. Visualización de la zona de estudio (Fuente: Google Earth).....   | 14 |
| Figura 5. Cartel de información (izquierda) y zona destinada a parque en la planicie de inundación (derecha) .....  | 14 |
| Figura 6. Curva de Gasto utilizada en el modelo como condición de contorno aguas abajo para el modelo 2D .....  | 16 |
| Figura 7. Superficie ráster del MDT 5x5 original del ICC.....   | 18 |
| Figura 8. Localización de la potabilizadora AGBAR (izquierda) y fotografía del dique existente (derecha).....   | 19 |
| Figura 9. Ráster del terreno original (izquierda), ráster tratado dando continuidad al dique de defensa (derecha) .....                                       | 20 |
| Figura 10. Localización del dique de defensa de la carretera BV-2002 y accesos a la carretera C-245.....  | 21 |
| Figura 11. Ráster del terreno original (izquierda), ráster tratado dando continuidad al dique de defensa (derecha) .....                                      | 21 |
| Figura 12. Puentes que cruzan la zona de estudio (Fuente: Google Earth).....  | 22 |
| Figura 13. Ráster original sin los pilares de los puentes.....  | 22 |
| Figura 14. Ráster tratado que contiene los pilares de los puentes .....   | 24 |
| Figura 15. Una de las obras de drenaje lateral que atraviesa el talud del AVE .....   | 24 |
| Figura 16. Ráster sin las aperturas del drenaje lateral (izquierda) y con aperturas laterales (derecha) .....   | 25 |
| Figura 17. Ráster con la compuerta abierta (izquierda) y con la compuerta cerrada (derecha).....  | 25 |
| Figura 18. Mapa de usos del suelo (Elaboración propia).....   | 27 |
| Figura 19. Mapa de rugosidad (Elaboración propia).....  | 28 |
| Figura 20. Creación de las secciones transversales para 1D y 1D/2D con ArcGis mediante la extensión Hec-GeoRas.....   | 29 |
| Figura 21. Hidrograma del PEF del Baix Llobregat i l'Anoia .....  | 30 |
| Figura 22. Hidrogramas para T=100 y T=10 años .....   | 31 |
| Figura 23. Visualización del terreno (izquierda) y del plano de rugosidad (derecha) desde Ras Mapper .....  | 33 |
| Figura 24. Malla 2D generada .....  | 34 |
| Figura 25. Break lines de la malla 2D .....   | 34 |
| Figura 26. Condiciones de contorno para régimen no permanente (izquierda), Hidrograma para T=100 (derecha superior) y Curva de Gasto (derecha inferior) ..... | 35 |
| Figura 27. Puntos de aplicación de las condiciones de contorno 2D.....  | 35 |
| Figura 28. Ventana de “Unsteady Flow Analysis” .....  | 36 |
| Figura 29. Manchas de inundación para diversos intervalos de simulación (T=100 años).....   | 38 |
| Figura 30. Nivel de agua en un punto de control para los diferentes intervalos de simulación.....   | 39 |
| Figura 31. Nivel de agua para el MDT original (T=100 años) .....  | 40 |
| Figura 32. Detalle de zona de inundación de la potabilizadora sobre MDT original.....   | 41 |
| Figura 33. Secuencia temporal de inundación para T=100 años .....   | 42 |
| Figura 34. Nivel máximo de agua sobre el MDT tratado (T=100 años).....  | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 35. Nivel máximo de agua sobre el MDT tratado (T=100 años).....  | 43 |
| Figura 36. Velocidades del agua sobre el MDT tratado (T=100 años) .....   | 44 |
| Figura 37. Secuencia de inundación para T=10 años .....   | 45 |
| Figura 38. Nivel máximo de agua sobre el MDT tratado (T=10 años) .....  | 46 |
| Figura 39. Velocidades sobre el MDT tratado (T=10 años).....  | 46 |
| Figura 40. Importación de la geometría a Hec-Ras para 1D.....   | 48 |
| Figura 41. Herramienta de Hec-Ras para la creación de puentes .....   | 49 |
| Figura 42. Nivel de agua en el punto 1 para los diferentes intervalos de simulación....                                   | 50 |
| Figura 43. Niveles de agua en los puentes (T=100 años) .....  | 51 |
| Figura 44. Resultados del calado máximo (izquierda) y la velocidad máxima (derecha) para T=100 años en el modelo 1D ..... | 52 |
| Figura 45. Perfil del río Llobregat para T=100 años .....   | 53 |
| Figura 46. Calado máximo para la sección 3752.607 (T=100 años) .....  | 53 |
| Figura 47. Resultados del calado máximo (izquierda) y la velocidad máxima (derecha) para T=10 años en el modelo 1D.....   | 54 |
| Figura 48. Perfil del río Llobregat (T=10 años).....  | 54 |
| Figura 49. Calado máximo para la sección 3752.607 (T=10 años) .....   | 55 |
| Figura 50. Pre proceso con ArcGis con la extensión Hec-GeoRas .....   | 56 |
| Figura 51. Nivel de agua en un punto para los diferentes intervalos de simulación.....                                    | 58 |
| Figura 52. Nivel máximo de agua para 1D/2D para T=100 años .....  | 59 |
| Figura 53. Velocidades del agua para 1D/2D para T=100 años.....   | 59 |
| Figura 54. Nivel máximo de agua para 1D/2D para T=10 años.....  | 60 |
| Figura 55. Velocidades del agua para 1D/2D para T=10 años .....   | 60 |
| Figura 56. Mapas de calados discretizados.....  | 63 |
| Figura 57. Mapas de velocidades discretizados.....  | 64 |
| Figura 58. Plano de ubicación de los puntos de análisis .....   | 67 |
| Figura 59. Calados en el punto 1 para los 6 modelos .....   | 68 |
| Figura 60. Niveles de agua para la sección 3611.575 .....   | 69 |
| Figura 61. Calados en el punto 2 para los 6 modelos .....   | 70 |
| Figura 62. Niveles de agua en la sección 3275.404 .....   | 71 |
| Figura 63. Calados en el punto 3 para los 6 modelos .....   | 71 |
| Figura 64. Niveles de agua en la sección 3752.607 .....   | 73 |
| Figura 65. Calados en el punto 4 para los 6 modelos .....   | 73 |
| Figura 66. Niveles de agua en la sección 3445.51 .....  | 74 |
| Figura 67. Calado máximo de para el MDT (T=100 años) .....  | 75 |
| Figura 68. Mapa de calados y velocidades para la zona inundada I (T=100 años) .....                                       | 76 |
| Figura 69. Mapa de calados y velocidades para la zona inundada II (T=100 años) .....                                      | 77 |
| Figura 70. Mapa de calados y velocidades para la zona inundada III (T=100 años) ....                                      | 78 |

## Objetivo

El objetivo de esta tesina final de máster es el aprendizaje, el uso práctico y el descubrimiento de las ventajas y las limitaciones de la nueva herramienta informática Hec-Ras 5.0, cuyo lanzamiento oficial al mercado data de marzo de 2016. Hec-Ras 5.0 permite la modelización hidráulica unidimensional, bidimensional y una combinación de ambas, tanto en régimen permanente como en régimen no permanente, algo que hasta ahora las versiones previas de Hec-Ras no permitían hacer.

En el momento de empezar el presente trabajo, esta versión era una versión beta, estaba en fase de prueba. Se lanzó una versión de prueba para detectar posibles errores antes de su comercialización oficial en el mercado. Éste nuevo producto que ofrece Hec-Ras es totalmente diferente a sus versiones anteriores, ya que desde 1995, año del lanzamiento público de Hec-Ras, éste solo ha permitido resolver problemas unidimensionales. Por lo tanto, esta nueva versión supone una revolución y un reto para esta nueva actualización del software del que todavía no se conocen exactamente sus ventajas y limitaciones.

Una vez estudiado el funcionamiento de dicha herramienta informática, se procederá a la realización de una simulación en un escenario real, para diversos periodos de retorno, donde se simulará la crecida de un río. La localización escogida para la realización del estudio de inundación es un tramo del río Llobregat situado entre *Sant Joan Despí* y *Cornellà del Llobregat* y que pasa por *Sant Boi de Llobregat*. Esta zona es conocida como el meandro de *Sant Boi de Llobregat*. En esta zona encontramos una gran planicie de inundación, con un gran meandro, donde el río Llobregat desbordará durante la crecida del río. En este escenario, donde el flujo del agua adquiere un movimiento bidimensional, se podrán evaluar las ventajas y limitaciones de esta herramienta y poner a prueba las nuevas capacidades que presenta Hec-Ras 5.0. Además, se realizarán diferentes tipos de modelizaciones para poder analizar sus ventajas e inconvenientes. Se desarrollará una primera modelización en 1D, una segunda modelización como combinación de zonas 1D (en la zona de cauce) y áreas 2D (planicie de inundación) y en tercer lugar una simulación completamente en 2D. Para la solución del modelo bidimensional, Hec-Ras aplica las ecuaciones de onda difusa o las ecuaciones Saint Venant (el usuario puede escoger), las cuales resuelve mediante el algoritmo de volúmenes finitos implícitos.

Finalmente, todos estos resultados serán analizados y comparados entre ellos, permitiendo extraer conclusiones sobre esta nueva aplicación informática disponible en el mercado. Además, permitirá analizar diferentes tipos de modelización y evaluar si los mayores tiempos de simulación que necesitan los modelos 2D y su mayor complejidad, proporcionan un mejor comportamiento y un mayor parecido a la realidad que respecto una simulación 1D.

# Introducción

Cuando se realiza un estudio de inundación en una zona fluvial, se nos presentan varias dudas e incógnitas, por ejemplo, hasta qué altura llegará el agua, qué velocidades se alcanzarán o qué dirección tomará el flujo de agua. Para poder responder a estas preguntas y muchas más, actualmente disponemos de herramientas informáticas específicas que nos permiten realizar modelizaciones hidráulicas y que nos permiten recrear y asemejarnos a la realidad, de esta manera se puede conocer cómo se comportará nuestro río para un determinado evento y se puede evaluar cuál es el riesgo existente.

Entre otras aplicaciones software de modelización hidráulica, destaca Hec-Ras, una de las herramientas informáticas de referencia dentro del campo de la hidráulica y que nos permite realizar todos estos cálculos y estudios que se han mencionado. La nueva versión Hec-Ras 5.0, permite realizar simulaciones en dos dimensiones, por lo que podemos estudiar con mayor precisión cómo se comportará el agua en zonas más planas y extensas como las planicies de inundación.

Por otro lado, en la actualidad, se dispone de mucha información topográfica, en concreto podemos encontrar información de muy fácil acceso sobre modelos digitales del terreno (MDT), dicha información nos proporciona la cota del terreno en puntos separados una cierta distancia. En Cataluña podemos descargarnos de forma libre y gratuita de la web del “*Institut Cartogràfic de Catalunya*”<sup>[1]</sup> los Modelos Digitales de elevación 5x5, por ejemplo, de todas las zonas de Cataluña. Toda esta información tan detallada facilita el uso de modelos hidráulicos basados en información geográfica y del terreno, ya que nos permite representar el escenario sobre el cual se realiza la simulación de manera muy realista. Esta nueva capacidad de precisión en la información topográfica y que gran parte de esta información sea accesible gratuitamente, ha permitido la popularización del uso de modelos 2D en el ámbito de la hidráulica.

Cuando se realiza un estudio de inundación de un río, podemos distinguir dos zonas. El cauce del río y las planicies de inundación. Los modelos 1D son ampliamente utilizados y proporcionan resultados muy precisos para los cauces de un río, ya que el movimiento se produce mayoritariamente en una dirección. No obstante, en las llanuras de inundación los movimientos son bidimensionales debido a las menores pendientes y diferentes velocidades que se generan, por lo tanto, para estas zonas el uso de modelos 2D está más recomendado. Finalmente, hay que destacar que a pesar de que los modelos 2D son la tecnología punta para la modelización de inundaciones, estos modelos tienen la desventaja y la limitación que requieren un hardware y un software mucho más potentes y unos tiempos de simulación mucho más grandes.<sup>[2]</sup>

# 1. Modelización hidráulica

## 1.1. ¿Qué es la modelización hidráulica?

Gran parte de los fenómenos que se producen en la naturaleza y especialmente dentro del mundo de la hidráulica, son fenómenos extremadamente complejos y que por lo tanto no son fáciles de tratar y de entender cómo funcionan. Además, en muchos casos resulta muy complejo proporcionar una solución que resuelva correctamente el comportamiento de los elementos ante un evento, como por ejemplo una tormenta. Este es el caso de las obras hidráulicas y los ríos, donde el comportamiento de las estructuras y del propio cauce es extremadamente difícil de predecir y de establecer qué alcance puede tener el evento. Por lo tanto, determinar cuál es el riesgo que existe para las estructuras que se encuentran en la zona de inundación es muy complejo. En la actualidad, existen diversas metodologías que nos permiten conocer el comportamiento del agua y anticiparnos a sus movimientos. Por lo tanto, con este tipo de información se podrá proteger y reducir la peligrosidad y los riesgos asociados a una inundación.

Existen varios tipos de modelos para representar la realidad hidráulica, entre ellos destacan <sup>[3]</sup>:

- a. *Los modelos físicos*: son los estudios de un fenómeno hidráulico, que analizan lo que le sucede a una obra de ingeniería mediante la creación de un modelo físico semejante simplificado el cual permite reproducir la realidad a una cierta escala y que mediante el cual se puede observar cómo se comportará dicha obra en la realidad cuando sea construida a otra escala.
- b. *Los modelos matemáticos*: éstos se definen como aquellos modelos en los que se utilizan ecuaciones o expresiones matemáticas que definen el fenómeno en estudio que se produce. Dentro de este tipo de modelos, se puede determinar tres tipologías diferentes de modelos matemáticos.
  - i. *Modelos determinísticos*: Se pueden definir como aquellos en que los procesos físicos involucrados se expresan mediante relaciones fundamentales determinísticas y en el cual no se tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
  - ii. *Modelos estocásticos*: En este tipo de modelos, los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias y probabilísticas que involucran el fenómeno en estudio.
  - iii. *Modelos de simulación numérica*: este tipo de modelos en los que se emplean, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales en los contornos. Resuelven el problema utilizando técnicas de análisis numéricas como los métodos basados en diferencias finitas o bien métodos basados en elementos finitos. A esta tipología de modelos pertenece Hec-Ras 5.0 así como la mayoría de los programas software de simulación hidráulica. Así pues, este trabajo se centra en este tipo de modelos. Tal y como se ha introducido, existen dos tipos de técnicas de análisis que permiten la resolución de los modelos de simulación numérica. Los métodos de resolución más utilizados son los siguientes:

- Métodos de diferencias finitas: Los métodos de diferencias finitas son capaces de simular algunos procesos que son imposibles de resolver mediante el cálculo simple. Se trata del método numérico clásico que resuelve ecuaciones diferenciales donde el problema discreto se obtiene remplazándolo por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{u_{n+1}-u_n}{\Delta x}$$

- Métodos de elementos finitos: este método está pensado para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Este método está pensado para ser utilizado en un ordenador. Dicho método, discretiza el área de estudio mediante una malla conformada por pequeños elementos con formas triangulares o cuadrangulares. Los vértices de estos elementos representan los nodos de la malla. En estos vértices se busca encontrar el valor de la variable incógnita, ya sea el nivel de agua o la velocidad. Estos elementos locales son ensamblados mediante los procedimientos de álgebra lineal en matrices globales, en los cuales el vector solución representa las soluciones nodales. Esta técnica general para hallar soluciones numéricas de sistemas de ecuaciones diferenciales e integrales, es esencialmente útil y versátil para acomodar geometrías complejas, permitiendo acomodar el tamaño y la forma de los elementos a las necesidades de modelación.

## 1.2. Software disponible para modelización numérica

Existen muchos programas software que permiten modelar y realizar simulaciones hidráulicas. Según el escenario en que nos encontramos (rotura de presa, inundación, transporte de sedimentos, drenaje...) existe un programa adecuado para simular dicho escenario. Este trabajo se centrará en los softwares disponibles para realizar estudios de inundación de ríos. Dentro de los programas que nos permiten realizar simulaciones para predecir y estudiar la inundación de ríos, algunos solamente permiten realizar cálculos en 1 dimensión y otros en 2 dimensiones. También existen algunos que permiten combinar una zona unidimensional con otra zona bidimensional. Estos últimos están pensados para estudiar la zona relativa al cauce del río mediante un modelo unidimensional y la planicie de inundación utilizando un modelo bidimensional. Cada modelo utiliza unas ecuaciones y una metodología para aproximarse a la solución distinta. Con referencia a los programas software disponibles, algunos de estos programas son libres y otros poseen licencias muy caras. Finalmente, destacar que algunos permiten incluir todo el desarrollo hidrológico en el mismo programa y otros no. Así pues, existe un gran abanico de opciones y por lo tanto de programas informáticos con los que se puede trabajar. Algunos de los programas más utilizados son, entre muchos otros:

- a. *Hec-Ras*: Es el programa más conocido y su uso está ampliamente extendido ya que se trata de un programa libre, muy completo y de fácil manejo. Su utilización y fama es a nivel internacional. Hasta la versión anterior a la 5.0, únicamente permitía

realizar cálculos unidimensionales, pero a partir de la versión 5.0 permite realizar cálculos bidimensionales y unidimensionales.

- b. *IBER*: Se trata de un modelo matemático bidimensional que posee un módulo hidrodinámico que resuelve las ecuaciones del flujo en lámina libre para aguas poco profundas mediante las ecuaciones de Saint Venant 2D. Este software ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). Finalmente, resaltar que tanto el módulo hidrodinámico como en el de turbulencia y el de sedimentos resuelven las ecuaciones en forma integral por el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada.<sup>[4]</sup>
- c. *MIKE 11*: Esta es una aplicación informática comercial desarrollada por el departamento de software “*Danish Hydraulic Institute*” (Dinamarca) para la modelación unidimensional de flujos en lámina libre y régimen variable. El modelo resuelve las ecuaciones de Saint Venant mediante diferencias finitas y un esquema implícito.<sup>[5]</sup>
- d. *TUFLOW*: Este software es uno de los programas informáticos de referencia para el cálculo de inundaciones en Reino Unido. Este software incluye un conjunto de algoritmos numéricos avanzados y herramientas de apoyo para simular el flujo de agua en superficies libres en áreas urbanas, ríos, llanuras aluviales, estuarios y costas.<sup>[6]</sup>

### 1.3. Tipos de modelización hidrodinámica

Tal y como se ha introducido anteriormente, la modelización hidráulica permite realizar modelos unidimensionales y bidimensionales. Actualmente, gracias al mayor desarrollo de los ordenadores y la gran cantidad de información topográfica detallada, fiable y al alcance de todos de manera gratuita, se está desarrollando y extendiendo el uso de modelos bidimensionales.

Cada situación y cada escenario tienen una solución y un modelo óptimo. No siempre el uso de un modelo más complejo, como un modelo bidimensional, representa mejor la realidad. Por ejemplo, los modelos 1D se consideran mucho más precisos y exactos en la zona del cauce principal, pero por otro lado, arrojan resultados inexactos para el flujo sobre zonas planas y extensas como puede ser una planicie de inundación. Por otro lado, los modelos bidimensionales pueden generar mayores inestabilidades y tiempos de ejecución elevados del programa. Estos tiempos tan altos pueden ser innecesarios en algunas situaciones.

Por lo tanto, cada situación es diferente y debe analizarse de una manera independiente. Sin embargo, se puede establecer una serie de reglas genéricas en función del tipo de escenario en el que nos encontramos que nos pueden ayudar a definir cuál es el mejor tipo de modelo y cual se adapta mejor a dicha situación.<sup>[2]</sup>

### **1.3.1. Modelos unidimensionales (1D)**

La primera tipología de modelos que podemos encontrar, son los modelos hidrodinámicos unidimensionales. Este tipo de modelos son ampliamente utilizados. Esta tipología está basada en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, en concreto en las leyes de conservación de la masa y el momento. Mediante estas ecuaciones se calcula la superficie libre de agua para un flujo de agua estacionario y no estacionario. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante la discretización numérica, usando frecuentemente el método de las diferencias finitas, y en algunos casos mediante elementos finitos o volúmenes finitos, en un esquema implícito. Una de las grandes ventajas de la modelización unidimensional es su bajo tiempo de resolución del problema, lo que simplifica considerablemente la realización del modelo. Además, un modelo 1D bien realizado puede conseguir un nivel de estabilidad mucho mayor y de una manera mucho más sencilla que con los otros tipos de modelizaciones. Algunos de los escenarios en los que sería recomendable utilizar modelos unidimensionales serían: <sup>[7]</sup>

- a. Aquellas localizaciones en las cuales el flujo de agua no se expande o se extiende de manera significativa.
- b. Canales bien definidos o ríos muy encauzados, con pendientes muy pronunciadas en los laterales que frenan la expansión lateral del río.
- c. Llanuras de inundación simplemente conectadas donde el flujo del canal principal está bien conectado al flujo de la llanura de inundación y que el flujo en ambos es principalmente unidireccional.
- d. Cuando se dispone datos de elevación de una mala calidad o en muy poca cuantía.

### **1.3.2. Modelos cuasi 2D (1D/2D)**

Una solución intermedia entre la realización de un modelo 1D y un modelo 2D, es realizar una aproximación cuasi 2D. Este tipo de método se beneficia de algunas de las ventajas de cada modelo y puede ser una gran solución en algún tipo de escenarios. Este método resulta útil en llanuras de inundación conectadas a un cauce bien encajado. En dicho escenario se utilizaría la solución unidimensional para el cauce del río y una solución bidimensional para la planicie de inundación. Gracias a esto, conseguiríamos reducir los tiempos de ejecución del programa ya que ahora hay un área 2D menor. Esto permite al flujo de agua desbordar sobre la planicie de inundación cuando el nivel del agua excede los bancos o diques del río. Aunque se han realizado muchos estudios usando modelos 1D/2D, y muchos de ellos se han aplicado exitosamente para la modelización de crecidas de ríos, hay poca información sobre la fiabilidad y precisión de los resultados de este tipo de modelo.

### **1.3.3. Modelos bidimensionales (2D)**

Finalmente, podemos desarrollar modelos hidrodinámicos bidimensionales. Este tipo de modelos son mucho más avanzados y utilizan las ecuaciones de conservación de la masa y momento expresadas en dos dimensiones. Los resultados son calculados en



cada punto de una malla que se genera en la zona de estudio. Los modelos 2D pueden resolverse mediante elementos finitos o bien mediante diferencias o volúmenes finitos.

Algunos de los escenarios en los cuales sería recomendable utilizar modelos de dos dimensiones son:

- a. Llanuras de inundación: la planicie de inundación de un río sería la zona ideal para realizar este tipo de simulaciones, ya que en una planicie de inundación el agua se desplaza en todas las direcciones y por lo tanto este tipo de modelo sería recomendable para obtener unos resultados mucho más precisos.
- b. Zonas urbanas: en ciudades, por ejemplo, sería más sencillo modelar mediante un modelo bidimensional ya que existen infinidad de objetos y obstáculos que pueden hacer variar la dirección del agua, así como muchas calles por las que el agua se puede desviar.
- c. Lugares donde el flujo se expande y se extiende: zonas donde el flujo puede variar de forma brusca y se expande de manera constante para luego encogerse. Mediante un modelo 2D se puede modelar mucho mejor esta condición.
- d. Aguas abajo de un dique que se rompe: este tipo de escenario de rotura son altamente complejos, por lo que el desarrollo de un modelo bidimensional es aconsejable.

Finalmente, hay que destacar que las simulaciones bidimensionales también presentan muchos problemas. Algunos de los problemas más importantes y que hay que tener en cuenta, son los siguientes:

- a. Elevado tiempo de simulación: este es quizás uno de los problemas más importantes de los modelos 2D. Si tenemos un área bastante grande con una gran cantidad de celdas en la malla, los tiempos de ejecución del programa pueden ser muy elevados. Una simulación para una cuenca de varios kilómetros con entre 100 000 y 1 millón de celdas puede durar horas.
- b. Necesidad de una buena información topográfica: si no se dispone de una información relativa al terreno de calidad el modelo no sirve para nada, ya que el resultado será totalmente impreciso.
- c. Curva de aprendizaje: este tipo de modelos son mucho más complejos y requieren de más estudio y conocimiento para poder realizar una simulación que se asemeje a la realidad

## 2. Hec-Ras 5.0

### 2.1. ¿Qué es Hec-Ras y para qué sirve?

Hec-Ras (*Hydrological Engineering Center - River Analysis System*) es un programa de modelización hidráulica que ha sido desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers* y que en la actualidad es uno de los programas de referencia dentro de su campo. Es un programa libre y gratuito que puede ser descargado fácilmente de su página oficial<sup>[8]</sup>. El hecho que sea un programa gratuito lo ha generalizado. Además, este software se encuentra en continuo desarrollo y actualización, por lo que se van lanzando al mercado nuevas funciones y mejoras en cada nueva versión.

El software Hec-Ras, está compuesto por cuatro tipos de módulos diferentes, que permiten el análisis de los ríos en los siguientes escenarios: <sup>[9]</sup>

- a. Modelización de flujo en régimen permanente.
- b. Modelización de flujo en régimen no permanente.
- c. Modelización del transporte de sedimentos.
- d. Análisis de calidad de aguas.

Hec-Ras permite simular los flujos de agua en canales artificiales o bien cauces naturales de ríos. Mediante esta herramienta informática, se puede determinar el nivel de agua en diferentes puntos, así como las velocidades, entre otros de los muchos parámetros que se pueden calcular. Por lo tanto, se trata de un programa ideal para realizar estudios de inundación.

### 2.2. Novedades de la versión 5.0 respecto versiones anteriores

Esta nueva versión del programa Hec-Ras, la versión 5.0, mantiene todas las funciones de las versiones anteriores y además incorpora nuevas funcionalidades. La gran novedad que posee esta versión es la capacidad de desarrollar cálculos bidimensionales y cálculos cuasi bidimensionales, es decir una modelización como combinación de zonas 1D y zonas 2D.

Las características más destacadas de Hec-Ras 5.0 son: <sup>[10]</sup>

- a. Resuelve las ecuaciones de Saint Venant y Onda Difusa para dos dimensiones.
- b. Modeliza mediante el método de los Volúmenes finitos implícitos.
- c. Incorpora un algoritmo para resolver el acoplamiento de modelos 1D y 2D.
- d. Permite modelizar mallas estructuradas y no estructuradas.
- e. Mejora en los tiempos de cálculo debido al aprovechamiento de varios procesadores en ordenadores de 32 y 64 bits.
- f. La modelización es más precisa en los cauces y en las planicies de inundación.
- g. El interfaz de visualización de Ras Mapper permite la visualización detallada de los resultados y el movimiento.

## 2.3. Ecuaciones y esquema numérico de Hec-Ras 5.0

Tal y como se ha introducido, Hec-Ras utiliza una serie de ecuaciones y métodos para resolver los cálculos. En este apartado, se mencionarán que tipo de ecuaciones y esquema numérico utiliza. Esta información está recogida más extensamente en manual del usuario del Hec-Ras <sup>[11]</sup>

- a. Ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D: Hec-Ras 5.0 permite realizar las simulaciones mediante las ecuaciones 2D de Saint Venant y de onda difusa. El programa permite una gran flexibilidad, ya que permite al usuario escoger cuál de las dos ecuaciones desea utilizar. La opción por defecto utiliza las ecuaciones de Onda difusa. Estas ecuaciones permiten resolver el modelo de una manera mucho más rápida y más estable. Por otro lado, las ecuaciones de Saint Venant permiten resolver un rango mayor de problemas a pesar que son más lentas y tienen una menor estabilidad. Para la resolución del ejemplo práctico de este trabajo, se ha utilizado la ecuación que viene por defecto, la ecuación de Onda difusa.
- b. Volúmenes finitos implícitos: El esquema numérico que se utiliza para la resolución de problemas en flujo no permanente es el de los volúmenes finitos implícitos. El algoritmo de solución implícita permite mayores intervalos de tiempo de computación que los métodos explícitos por lo que es más sencillo realizar los cálculos. La solución de volúmenes finitos tiene una mayor estabilidad y robustez que las tradicionales técnicas de diferencias finitas. Además, cabe destacar, que con el uso de volúmenes finitos se consigue que el mojado y secado de las zonas del río, con incluso grandes avenidas repentinas, tenga una gran estabilidad y nos proporcione una solución muy estable. Finalmente destacar que el algoritmo es muy estable en cualquier tipo de régimen, tanto en régimen supercrítico, subcrítico o mixto.
- c. Algoritmo de solución para la combinación de modelos 1D y 2D: se trata de un algoritmo nuevo que permite la resolución de un modelo con zonas realizadas y calculas en 1D y otras zonas con una malla en 2D. Este tipo de simulación es perfecta para modelar el río en 1D y conectarlo a una planicie de inundación calculada en 2D.

## 2.4. Tamaño de la malla e intervalo del tiempo de simulación

Uno de los puntos clave para realizar una simulación 2D es qué tipo de malla generamos. Hec-Ras permite la realización de mallas computacionales estructuras y no estructuras. Este software ha sido diseñado para trabajar con mallas no estructuras, pero también permite crear mallas estructuras. Cada una de las celdas que se crea en el programa puede tener diferentes formas. El programa admite entre 3 y 8 lados a cada una de las celdas.

Acorde al manual del usuario de Hec-Ras <sup>[11]</sup>, cada celda tiene las siguientes propiedades: centro de celda, contorno de celda y puntos en contorno de celda. Gracias a que Hec-Ras genera estas relaciones, se pueden realizar celdas más grandes conservando los detalles del terreno. Esto resulta ser una gran ventaja ya que permite utilizar menos tiempo de simulación para realizar los cálculos. La malla generada se puede manipular con la opción de mover puntos y el programa permite editarla como el

usuario desee, agregar puntos o desplazarlos. Hec-Ras realiza el proceso de mallado siguiendo la técnica de triangulación de Delaunay y luego construye un diagrama de Voronoi.

Un punto importante que está relacionado con el tamaño de la malla es el intervalo del tiempo de simulación que se escoge para realizar la modelización. Este tiempo debe ir relacionado con el tamaño de la celda para que tengamos unos buenos resultados y que no se generen problemas de inestabilidad y resultados falsos. El manual de Hec-Ras 5.0 hace referencia a dos maneras de escoger este tiempo de paso para la simulación. Estas maneras se basan en el número de Courant. Y se aplicará de diferente manera según se esté utilizando la ecuación de Saint Venant o la ecuación de la onda difusa. Estas condiciones se han de satisfacer para que la simulación sea estable. Las ecuaciones que se utilizan para determinar este intervalo de paso son las siguientes:

a. Para la ecuación Saint Venant:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (con un valor máximo de } C = 3.0)$$

Donde:

$C$  = Numero de Courant

$V$  = Velocidad del flujo [pies/s]

$\Delta T$  = Intervalo del tiempo de computación [s]

$\Delta X$  = Tamaño promedio de la celda [pies]

b. Para la ecuación de la onda difusa:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (con un valor máximo de } C = 5.0)$$

## 2.5. Limitaciones del nuevo programa Hec-Ras 5.0

Algunas de las limitaciones que presenta esta nueva versión del programa son:<sup>[11]</sup>

- a. Con respecto a la generación de mallas en 2D, no existen suficientes herramientas automatizadas para generar una malla computacional 2D detallada. Es cierto que existen herramientas para modificar y editar la geometría de la malla, pero esto lo debe hacer el usuario de forma manual, lo que lo puede convertir en un proceso largo y tedioso proceso para grandes mallas. Versiones posteriores deberían incluir herramientas para editar de una manera más sencilla estas mallas,
- b. La generación de estructuras hidráulicas dentro de un área 2D, también es un proceso poco flexible y que es muy laborioso para el usuario.
- c. No hay posibilidad de ejecutar una simulación de transporte de sedimentos que se haya producido por la erosión o la deposición dentro de un área 2D.
- d. No se puede realizar una simulación de calidad de agua dentro de un área 2D.

- e. No se pueden utilizar las capacidades de modelización de puentes de Hec-Ras dentro de un área 2D.

## 2.6. Interfaz de Hec-Ras 5.0, generación de un terreno y de un mapa de rugosidad

Hec-Ras 5.0 presenta una interfaz muy similar a sus versiones anteriores. En este apartado se mostrarán algunas de las ventanas y funcionalidades más importantes del programa. Tal y como en versiones anteriores, cuando se abre el programa se encuentra la página principal con todas sus opciones y menús. Como novedad en dicha versión, encontramos la ventana de Ras Mapper que es la ventana mediante la cual se acceden a las nuevas funcionalidades del 2D.

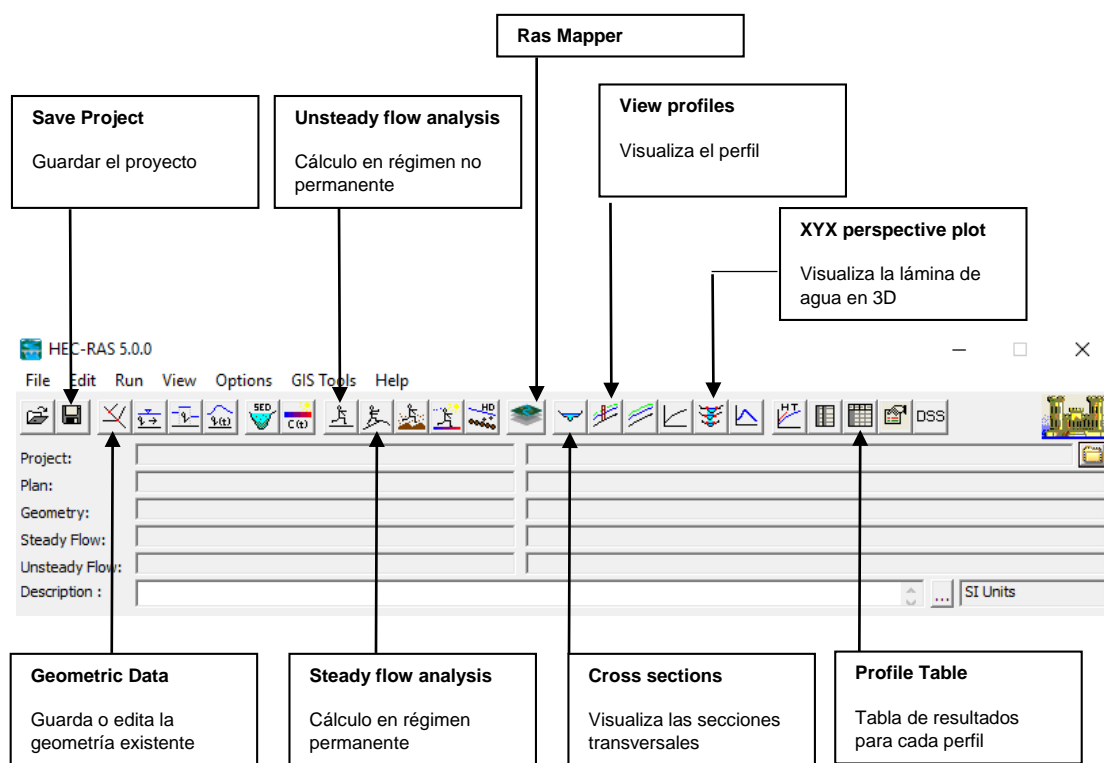


Figura 1. Ventana principal de Hec-Ras y algunos de los botones más relevantes

Como en versiones anteriores, debajo del menú de opciones encontramos diversos iconos con diferentes símbolos que permiten acceder a cada una de las funcionalidades del programa. En este trabajo no se explicarán los conceptos básicos de Hec-Ras para evitar explicar información básica que se puede encontrar mucho más detallada en el manual del usuario de Hec-Ras <sup>[11]</sup>. Únicamente se expondrán, de una manera muy resumida, aquellos elementos nuevos y que no existan en versiones anteriores.

El elemento más innovador es la ventana de Ras Mapper, que nos permite la visualización de los resultados y la creación de terrenos sobre los cuales podremos generar las mallas y sobre los que el programa extraerá la información topográfica para realizar el mallado. Así pues, la generación del terreno se realizará en Ras Mapper. Para

crear un terreno, se debe ir la opción *Tools>create a new terrain*. Una vez en esta ventana, se debe cargar el archivo que contenga la información del terreno de la zona que se está estudiando. El resultado es la visualización del terreno de la Figura 2, en el cual puede apreciar el relieve y la forma de esta zona.

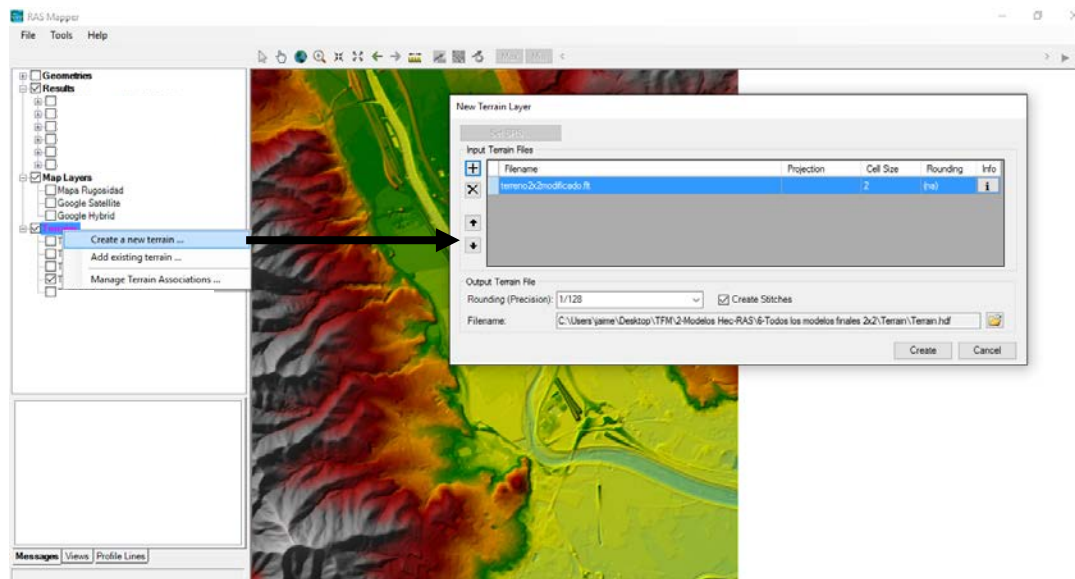


Figura 2. Creación del terreno en Ras Mapper

Otra función muy importante de la ventana de Ras Mapper, es la generación del mapa de rugosidad, el procedimiento para crear este plano es muy similar. Se debe ir sobre la opción *Map Layers*, presionar el botón derecho e ir a *Add new Land Cover*. Una vez se está en esa ventana, se debe cargar el plano de rugosidad. El resultado es la visualización del mapa de rugosidad con los diferentes coeficientes. Este plano se puede ver *Figura 3*.

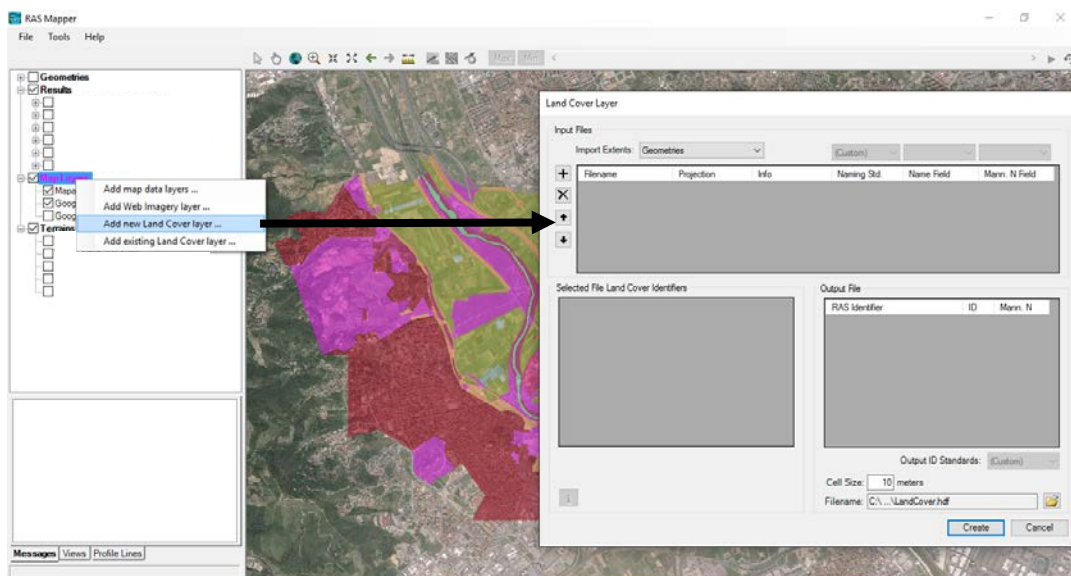


Figura 3. Creación del mapa de rugosidad en Ras Mapper

### **3. Preparación de los datos necesarios para la simulación mediante Hec-Ras 5.0 en el meandro de Sant Boi**

Una vez estudiado el funcionamiento de Hec-Ras 5.0 y analizadas todas sus nuevas funcionalidades, se realizará una aplicación práctica mediante dicho programa sobre un escenario que permita conocer qué ventajas y limitaciones presenta en un escenario complejo. Para ello, se ha seleccionado una zona fluvial con un elevado riesgo de inundación. Además, esta zona está localizada en Cataluña, para poder realizar visitas a la zona de una manera más sencilla. La zona había de tener una serie de propiedades geométricas, tales como una gran planicie de inundación, para que el agua adquiriera diversas direcciones y velocidades, es decir, un comportamiento bidimensional y que por lo tanto se pudiesen apreciar mejor las ventajas y desventajas de una modelización 2D y que diferencias existen con otros tipos de modelos como el 1D o el cuasi 2D.

#### **3.1. Zona de estudio**

Tal y como se ha introducido, la zona de estudio seleccionada es un área fácilmente inundable, que forma parte del río Llobregat. El río Llobregat es un río de aproximadamente 175 km de longitud que nace en Castellar de Nurch y que desemboca en el mar Mediterráneo. La superficie de su cuenca es de 4948 km<sup>2</sup>. Este río atraviesa gran parte de Cataluña (España). El área donde se realizará el análisis está ubicado a pocos kilómetros de la desembocadura del río Llobregat al mar. En concreto, se encuentra entre los municipios de *Sant Boi de Llobregat* y *Cornellà de Llobregat*.

El *2Anexo 1. Planos de ubicación*” contiene dos planos de ubicación donde se puede apreciar la zona donde se realizará el análisis. El plano 1 muestra una visión de la zona mediante una ortofoto a una escala 1:20 000. El plano 2 muestra la base topográfica de la zona a una escala de 1:20 000. Esta información ha sido descargada de la web del *Institut Cartogràfic de Catalunya* [1]. En la *Figura 4. Visualización de la zona de estudio en 3D*” también se puede ver la zona de estudio y su ubicación, acorde a información de *“Google Earth”* de una manera más simplificada.



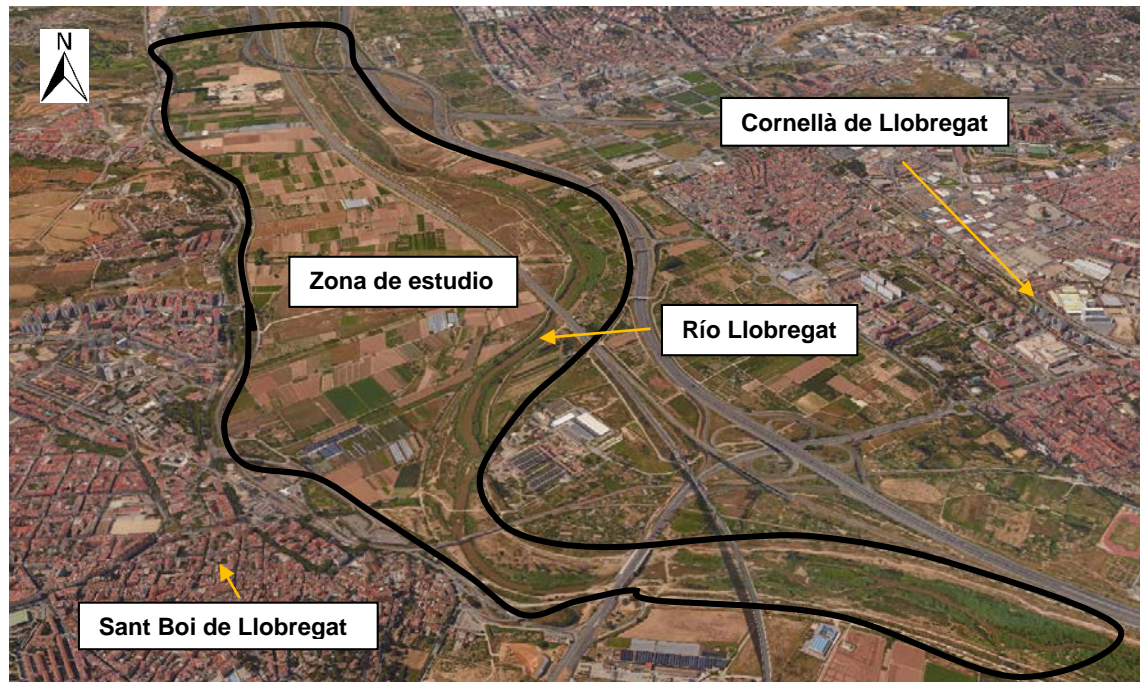


Figura 4. Visualización de la zona de estudio (Fuente: Google Earth)

La zona de análisis tiene un área aproximada de 4 km<sup>2</sup> y en ella se localiza un gran meandro conocido como el meandro de *Sant Boi de Llobregat*. Toda esta zona es utilizada como parque fluvial, por lo tanto, cuando por el río circulan caudales habituales, esta zona es completamente accesible y se utiliza como parque y zona de recreo. Se pueden encontrar infinidad de caminos para poder andar o ir en bicicleta, así como zonas de parque y bancos para poder hacer picnic y descansar. Cuando se produce una crecida del río Llobregat toda esta zona quedará inundada. Las inmediaciones están debidamente señalizadas como zona inundable mediante carteles que alertan a los usuarios del peligro de esta zona en caso de crecida del río.



Figura 5. Cartel de información (izquierda) y zona destinada a parque en la planicie de inundación (derecha)



### 3.2. Información de partida y condiciones de contorno para el modelo

Para poder realizar el estudio de inundación mediante Hec-Ras, se ha de disponer de una serie de datos previos que se son necesarios introducir en el modelo para que funcione correctamente. La información que necesitamos para desarrollar nuestro modelo es la siguiente:

- a. Información topográfica del terreno: Para la modelización bidimensional es necesario disponer de un Modelo Digital del Terreno (MDT), ya que para el desarrollo de la malla es necesario introducir los datos de elevación y la cota de cada punto del terreno, esta información nos la proporciona el MDT. En este trabajo se ha utilizado un MDT con una precisión de 5x5 metros, que se ha descargado de manera gratuita de la web del ICC.<sup>[1]</sup> Hay destacar que en el momento en el que se inició el trabajo y se desarrollaron los modelos, este MDT era el que tenía mayor precisión y estaba disponible. No obstante, meses después, cuando ya se había finalizado el trabajo, apareció en la web del ICC un MDT con una precisión de 2x2. Sin embargo, no se tuvo tiempo para cambiar los modelos, ya que el trabajo estaba en su fase final. Por lo tanto, se han desarrollados los modelos con el Modelo Digital del Terreno de 5x5 metros.
- b. Información hidrológica: Se requiere el hidrograma del río Llobregat para diferentes tiempos de retorno. Los modelos se desarrollarán para dos tiempos de retorno,  $T=10$  y  $T=100$  años, por lo que serán necesarios dos hidrogramas. El apartado “3.4. Hidrología” muestra que hidrogramas se han utilizado y cómo se ha obtenido.
- c. Mapa de usos de suelo y rugosidad: el modelo también requiere un mapa de rugosidad del terreno donde se definen los coeficientes de Manning que se utilizaran. El apartado “3.3.3. Mapa de usos de suelo y rugosidad” muestra el mapa de rugosidad utilizado y cómo se ha elaborado.
- d. Condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo del modelo: Con respecto a las condiciones de contorno, el modelo requiere unas condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo de la zona de estudio. Unas malas condiciones de contorno pueden provocar inestabilidades en el modelo y unos resultados falsos. Lo primero que hay que tener en cuenta es que estas condiciones de contorno se han de aplicar lo suficientemente lejos de la zona que nos interesa estudiar, para que no afectan negativamente al área de estudio. La zona que nos interesa estudiar es la planicie de inundación, por lo que se han aplicado las condiciones a suficiente distancia aguas arriba y abajo del río para que el modelo no funcione inestablemente y que dichas condiciones no interfieran en los resultados.

Para la modelización 2D, se han aplicado los hidrogramas de flujo como condiciones de contorno aguas arriba (Véase el apartado “3.4. Hidrología”) y una curva de Gasto (Rating Curve) como condición de contorno aguas abajo. Una curva de Gasto es una relación entre el nivel de agua y el caudal circulante en una sección determinada de un río ( $H,Q$ ). Las unidades en las que se suele expresar son en metros y metros cúbicos por segundos, respectivamente.<sup>[12]</sup> Esta curva de calado ha sido proporcionada por el equipo Flumen, de la Universidad Politècnica de Catalunya, los cuales realizaron un proyecto en una zona muy cercana situada aguas abajo y

disponían de un modelo hidráulico aguas abajo del meandro. Con los datos de esa modelización, se generó una curva de Gasto, que se adecua a nuestra zona y la cual se utilizará como condición de contorno aguas abajo en el modelo bidimensional.

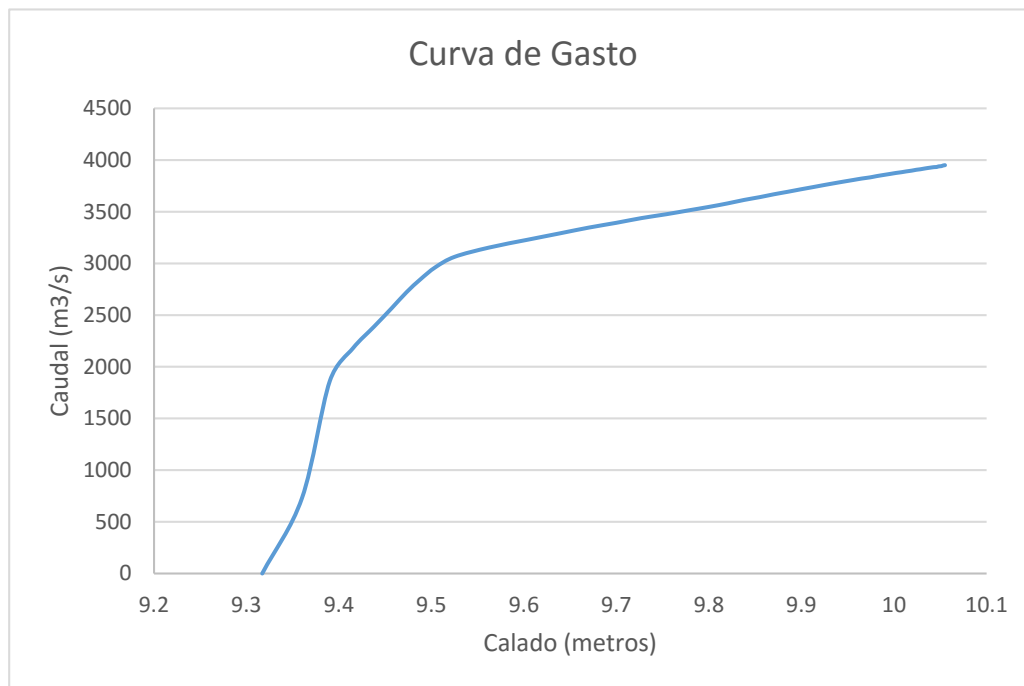


Figura 6. Curva de Gasto utilizada en el modelo como condición de contorno aguas abajo para el modelo 2D

Con respecto a los modelos 1D y 1D/2D, la condición de contorno aguas abajo que se ha utilizado ha sido la condición de calado normal. No se ha utilizado la curva de Gasto, ya que con la condición de calado normal se obtenían mejores resultados. El nivel máximo de agua era el mismo con ambas condiciones de contorno, pero con la condición de calado normal se modelaban mejor todos los instantes de tiempo que dura la simulación, no únicamente el instante de máximo valor.

La condición de calado normal de agua es una de las condiciones de contorno más utilizadas. Una de las mejores metodologías para obtener el valor de dicho parámetro es calcular la pendiente media del lecho del río debajo del tramo de río modelado. Si no se dispone de esta información también se puede aproximar este valor a la pendiente media de las dos últimas secciones del modelo o bien, en caso que sea muy plano y está pendiente no sea representativa de todo el tramo de estudio, se podría utilizar, como aproximación, la pendiente media de la zona de estudio.<sup>[13]</sup>

Finalmente, destacar que el modelo 1D/2D requiere de una condición interna adicional. Se ha de establecer como se conectarán la zona del modelo 1D con la zona del modelo 2D. Para ello, se establecen diversas maneras de realizarlo, según las condiciones geométricas que se presenten. Para este trabajo, dada la forma del cauce y que la planicie de inundación se encuentra en un lateral del río, se ha utilizado una estructura lateral como condición de conexión. Es decir, se ha creado una estructura lateral mediante ArcGis a lo largo del margen del río en la zona fronteriza entre la zona del cauce que se estudiará con el modelo 1D y la zona de la malla 2D.

La siguiente tabla, resume las condiciones de contorno que se utilizarán en el modelo hidráulico.

|              | Simulación 1D                                 | Simulación 1D/2D                              | Simulación 2D   |
|--------------|---|---|---|
| Aguas arriba | Hidrograma en la sección transversal 6235.079 | Hidrograma en la sección transversal 6235.079 | Hidrograma en zona de la malla correspondiente al río Llobregat |
| Aguas abajo  | Curva de Gasto                                | Calado Normal=0.0011                          | Calado Normal=0.0011  |

*Tabla 1. Condiciones de contorno aplicadas en Hec-Ras 5.0*

Finalmente, destacar que el modelo 1D/2D requiere de una condición interna adicional. Se ha de establecer como se conectarán la zona del modelo 1D con la zona del modelo 2D. Para ello, se establecen diversas maneras de realizarlo, según las condiciones geométricas que se presenten. Para este trabajo, dada la forma del cauce y que la planicie de inundación se encuentra en un lateral del río, se ha utilizado una estructura lateral como condición de conexión. Es decir, se ha creado una estructura lateral mediante ArcGis a lo largo del margen del río en la zona fronteriza entre la zona del cauce que se estudiará con el modelo 1D y la zona de la malla 2D.

### 3.3. Pre proceso mediante ArcGis

Antes de empezar a trabajar con Hec-ras 5.0, es necesario realizar un trabajo previo con un programa de SIG (Sistemas de Información Geográfica). En esta tesina de máster, se ha utilizado el programa ArcGis para tratar la información del terreno descargada del ICC. Así pues, para modelos 2D, la información del MDT requiere ser tratada, ya que hay ciertos elementos que no han quedado reflejados en el MDT y que generarán resultados ficticios e incorrectos, tal y como se verá en el apartado “4.1.2.1. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D en el MDT original para  $T=100$  años”. Así pues, este MDT descargado requiere adaptarlo, tratarlo y añadir todo aquello que no ha quedado reflejado para que el modelo que después se desarrollará mediante Hec-Ras sea correcto. Estas modificaciones no se pueden realizar mediante Hec-Ras. Además, hay que destacar que la información descargada del ICC, relativa al MDT, está en formato .txt y Hec-Ras no es capaz de leer este tipo de ficheros. Por lo tanto, será necesario utilizar ArcGis, tanto para adecuar el terreno a la realidad existente, como para realizar transformación de formatos a unos que pueda leer Hec-Ras.

### 3.3.1. Problemas detectados en el modelo digital del terreno del ICC

Tal y como se ha introducido, una vez se dispone del fichero que contiene la información de elevaciones del terreno. Se debe abrir mediante ArcGis y abrir el archivo .txt que contiene la información de la elevación del terreno cada punto cada 5 metros. Posteriormente, se creará una superficie ráster para poder visualizar este terreno. La *Figura 7* muestra la visualización de este archivo ráster.

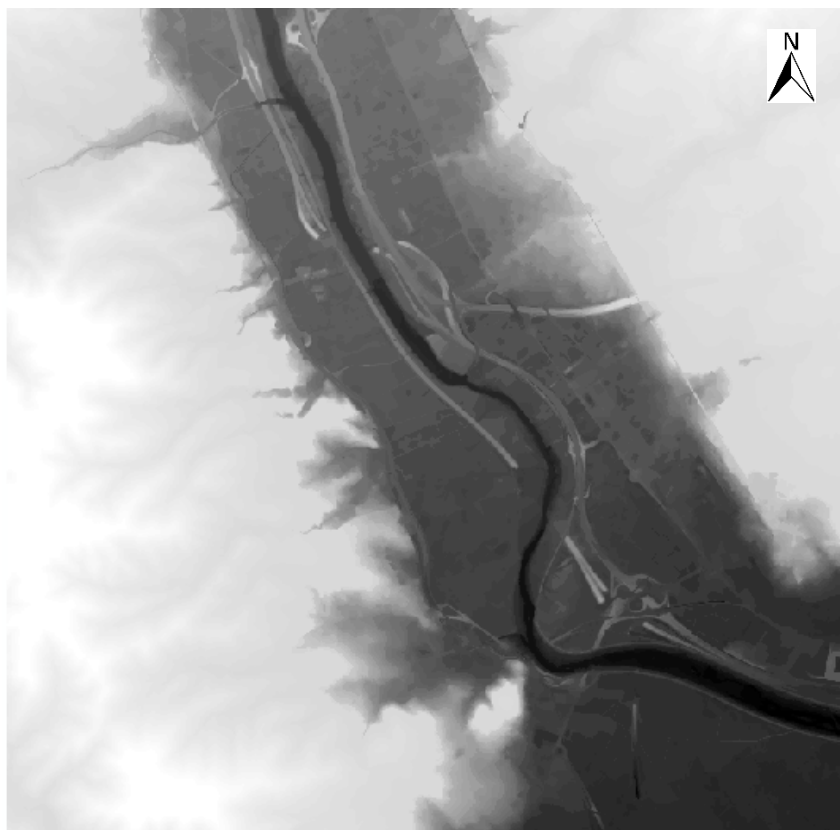


Figura 7. Superficie ráster del MDT 5x5 original del ICC

El modelo digital del terreno que se ha descargado del ICC data del año 2011 y es la información más reciente que está disponible. Por lo tanto, en estos 5 años, se pueden haber construido o modificado nuevas infraestructuras, que no han quedado reflejadas. Mediante una visita a la zona de estudio, las ortofotos existentes de esta área, las imágenes de satélite de Google Earth, la base topográfica 1:5 000 de la zona y el documento “*Planificació de l’espai fluvial de L’Anoia i el Baix Llobregat*” realizado por l’*Agència Catalana de l’Aigua* <sup>[14]</sup>, se han detectado una serie de desajustes con la realidad actual que se han de ser solucionados para poder obtener unos resultados buenos. Algunas de las incongruencias que se han detectado son las siguientes:

- a. El dique de la potabilizadora AGBAR, en *Sant Joan Despí*, no queda reflejado en el MDT.
- b. Inexistencia del dique que protege la Carretera BV-2002 y accesos a la carretera C-245.
- c. Inexistencia de los pilares de los puentes que cruzan el río Llobregat.

- d. Inexistencia de las obras de drenaje lateral que cruzan el talud del tren de alta velocidad.
- e. Compuertas situadas en el margen izquierdo del río, que en el MDT aparecen abiertas pero que en caso de avenida están cerradas.

Los puntos singulares que atraviesan nuestra zona de estudio y que se han tenido que modificar para ajustarse a la realidad, quedan reflejados en el “Anexo 2: Álbum fotográfico de la zona de estudio”. En este anexo se recoge el material fotográfico de la visita a la zona con información relevante de cada uno de estos puntos.

#### 3.3.1.1. Dique de defensa de la potabilizadora **AGBAR**

En primer lugar, uno de los elementos que destaca en el margen izquierdo del río Llobregat es la potabilizadora **AGBAR**, situada en *Sant Joan Despí*. Una construcción muy importante y extremadamente visible a lo largo de toda esta zona. Esta instalación dispone de un dique de defensa que la protege ante inundaciones.



Figura 8. Localización de la potabilizadora AGBAR (izquierda) y fotografía del dique existente (derecha)

El MDT del terreno no refleja correctamente la altura y no da continuidad a dicha estructura tal y como podemos ver en la *Figura 9*. La imagen de la izquierda se corresponde con el MDT original que se ha descargado, y podemos apreciar la discontinuidad de dicho dique. Por lo tanto, para que el modelo no nos proporcione un resultado falso y ficticio, tal y como se puede comprobar en la simulación realizada en el Apartado “4.1.2.1. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D en el MDT original para  $T=100$  años” de este trabajo, se ha de crear esta mota.

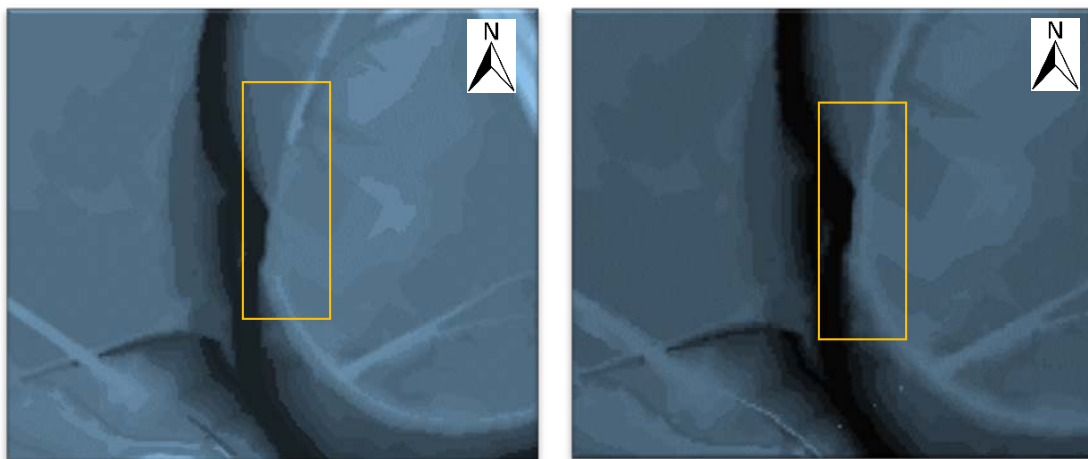


Figura 9. Ráster del terreno original (izquierda), ráster tratado dando continuidad al dique de defensa (derecha)

Para solucionar esta inundación ficticia que se produciría sin la presencia de este dique, se ha generado una superficie TIN en ArcGis a partir de la superficie ráster original descargada del ICC. Esta superficie TIN es más fácil de editar, ya que editar un ráster es muy complejo. Así pues, se ha modificado la elevación de la superficie TIN, añadiéndole la altura del dique. La altura que se le ha dado a este dique se ha basado en la base topográfica 1.5000 de la zona y las medidas tomadas durante la visita a la zona. Una vez editada la superficie TIN, se ha vuelto a transformar en una superficie ráster. Finalmente, mediante la herramienta “*Mosaic to new raster*”, con la opción de juntar los dos rústers cogiendo el valor máximo de estos dos que mezclamos (El original y la zona de la mota que se ha creado), se crea superficie ráster que se puede ver a la derecha de la *Figura 9* y donde se puede apreciar claramente la continuidad del dique de protección de la potabilizadora.

### 3.3.1.2. Carretera BV-2002 y accesos a la carretera C-245

En segundo lugar, podemos comprobar que los diques existentes aguas arriba del puente de *Sant Boi de Llobregat*, en el margen derecho del río Llobregat y que están situados paralelos a la carretera BV-2002 y a los accesos de la carretera C-245, tampoco han quedado reflejados en el modelo digital del terreno.





Figura 10. Localización del dique de defensa de la carretera BV-2002 y accesos a la carretera C-245

Por lo tanto, para no generar una inundación ficticia en esta zona, se ha de crear este muro. La metodología que se ha seguido para crear este muro ha sido la misma que se ha utilizado en el apartado anterior “3.3.1.1. *Dique de defensa de la potabilizadora AGBAR*”, pero ajustándolo a las cotas y medidas que se han podido observar en la visita a la zona de este dique.

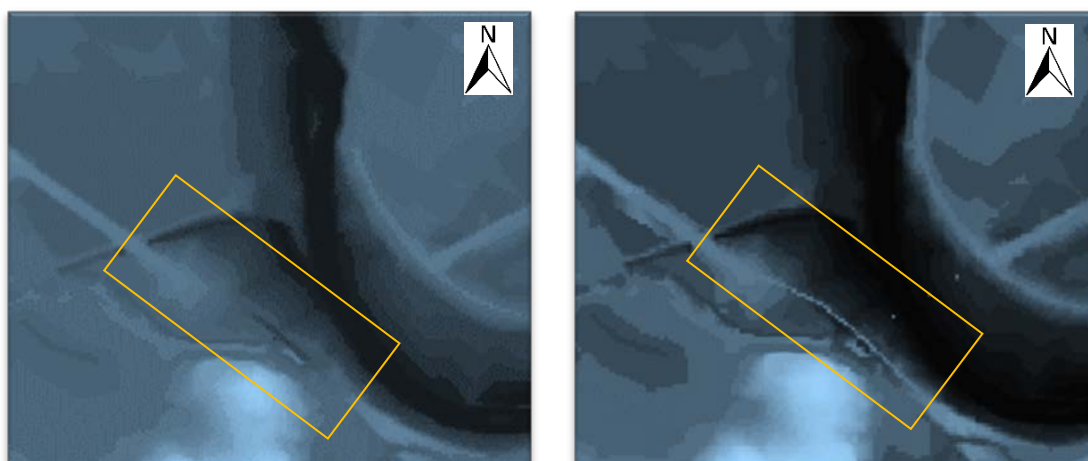


Figura 11. Ráster del terreno original (izquierda), ráster tratado dando continuidad al dique de defensa (derecha)

### 3.3.1.3. Pilares de los puentes

La zona donde se ha centrado el estudio es atravesada por diversos puentes, en concreto por 4 puentes. Estos cuatro puentes se pueden visualizar en la *Figura 12* y en el *Anexo 2*, donde se puede encontrar material fotográfico de dichos puentes. Los pilares de dichos puentes no aparecen en el MDT.

Los cuatro puentes que cruzan la zona de estudio son los siguientes:

1. Puente del tren de alta velocidad (AVE) de la línea Barcelona-Madrid tramo aguas arriba.

2. Puente del ferrocarril de la línea Barcelona-Manresa.
3. Puente de la carretera C-245.
4. Puente del tren de alta velocidad (AVE) de la línea Barcelona-Madrid tramo aguas abajo.



Figura 12. Puentes que cruzan la zona de estudio (Fuente: Google Earth)

En la *Figura 13* se pueden ver, como efectivamente, ninguno de los pilares de estos puentes ha quedado reflejado en el MDT. Por lo tanto, para tener unos resultados más precisos y más realistas es necesario introducir estas modificaciones en nuestro terreno para que se ajusten más a la realidad vigente.

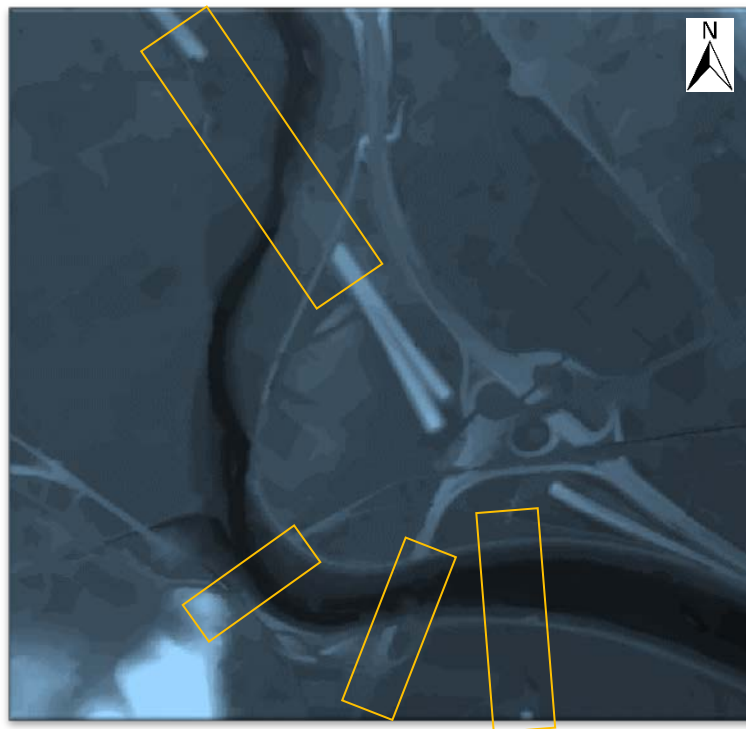


Figura 13. Ráster original sin los pilares de los puentes



Para crear estos pilares, se ha seguido los procedimientos descritos anteriormente. Para conocer qué cantidad de pilares se han de colocar y qué tamaño tienen éstos, se ha ido a la zona y se han medido, ya que no se ha tenido acceso a planos y medidas oficiales de estos puentes. Así pues, se ha tenido que realizar una aproximación de sus medidas en función de la que se ha podido ver insitu. La siguiente tabla muestra algunos de los datos más relevantes que se han tenido en cuenta para crear los pilares. Más información, sobre estos puentes puede verse en el “Anexo 3. Álbum fotográfico de la zona de estudio”.

| <b>Puente</b>                            | <b>Pilares</b>                   | <b>Forma y tamaño aproximado de los pilares</b> | <b>Longitud aproximada del puente</b> |
|--|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| Puente del AVE aguas arriba              | Dos filas de 14 pilares cada una | Circular  | 640 metros                            |
| Puente del ferrocarril Barcelona-Manresa | Dos filas de 8 pilares cada una  | Circular  | 205 metros                            |
| Puente de la carretera C-245             | 7 pilares                        | Rectangular                                     | 372 metros                            |
| Puente del AVE aguas abajo               | 12 pilares<br>4 pilares          | Rectangular<br>Circular                         | 648 metros                            |

Tabla 2. Información sobre los pilares de los puentes que cruzan la zona de estudio

Finalmente, con toda esta información se ha creado y obtenido el siguiente ráster con todos los pilares para los cuatro puentes:

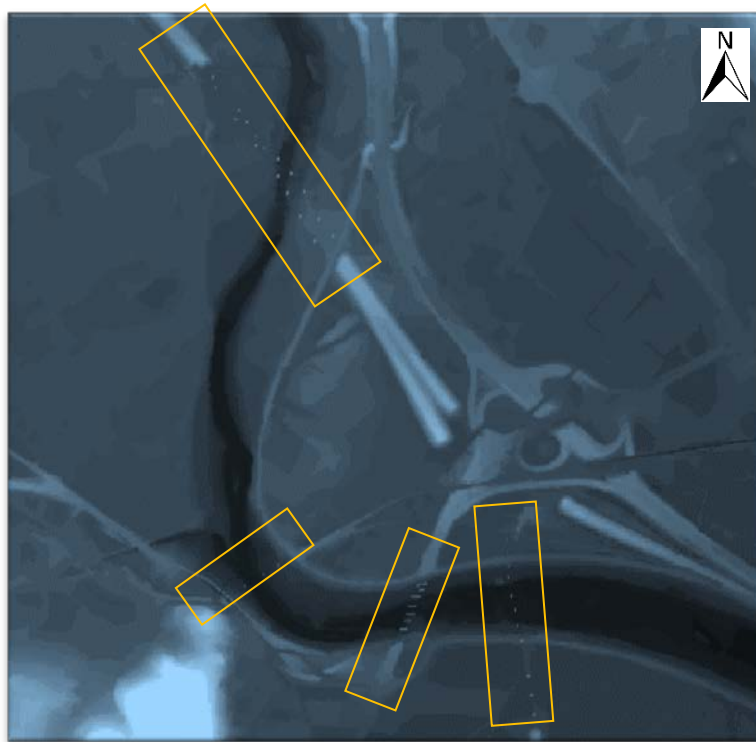


Figura 14. Ráster tratado que contiene los pilares de los puentes

### 3.3.2. Zonas críticas

#### 3.3.2.1. Obres de drenaje lateral

Uno de los elementos que más se aprecian, si nos paseamos por la zona, es un gran talud que sirve como base para el tren de alta velocidad (AVE). Este talud es una importante barrera entre el río Llobregat y diversas zonas localizadas al Oeste de este mismo río. A lo largo de este talud existen una serie de obras de drenaje lateral que cruzan por debajo el talud y que conectan ambos lados.



Figura 15. Una de las obras de drenaje lateral que atraviesa el talud del AVE

Tal y como se puede apreciar en la *Figura 16*, estas obras no figuran en el MDT por lo que se han tenido que modificar e incluirlas, ya que estos puntos sirven para que el agua

atraviese este talud. En caso de no incluirlos se está generando una gran barrera para el agua que es totalmente ficticia y que no se ajusta la realidad.

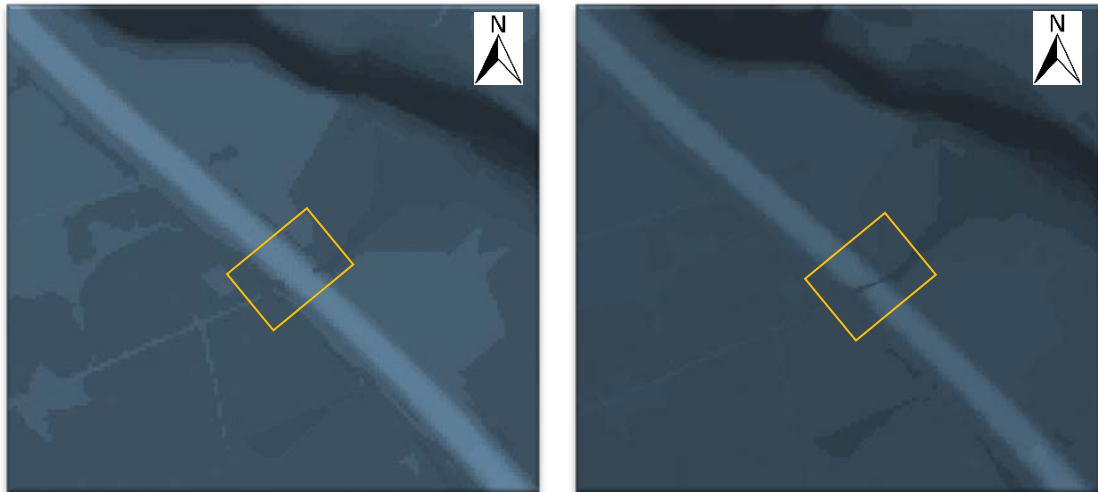


Figura 16. Ráster sin las aperturas del drenaje lateral (izquierda) y con aperturas laterales (derecha)

Para simular esta apertura se procederá de la misma manera que en apartados anteriores. Se abrirá un hueco en este talud y se le aplicará al terreno la cota del terreno de las inmediaciones que ya existe. En este caso al utilizar la herramienta “*Mosaic to new raster*” se juntarán los rásters tomando en las zonas comunes de ambos el valor mínimo del ráster, de esta manera generaremos un nuevo ráster que contenga este paso subterráneo. Finalmente, existe otra obra de drenaje lateral, situada en el margen izquierdo del río Llobregat en el municipio de *Sant Joan Despí*. Esta estructura lateral dispone de unas compuertas que se cierran en caso de avenida, según información de *l’Agència Catalana de l’Aigua* <sup>[14]</sup>. El MDT contiene la compuerta abierta, así pues, se ha de ajustar el MDT para simular que la compuerta está cerrada.

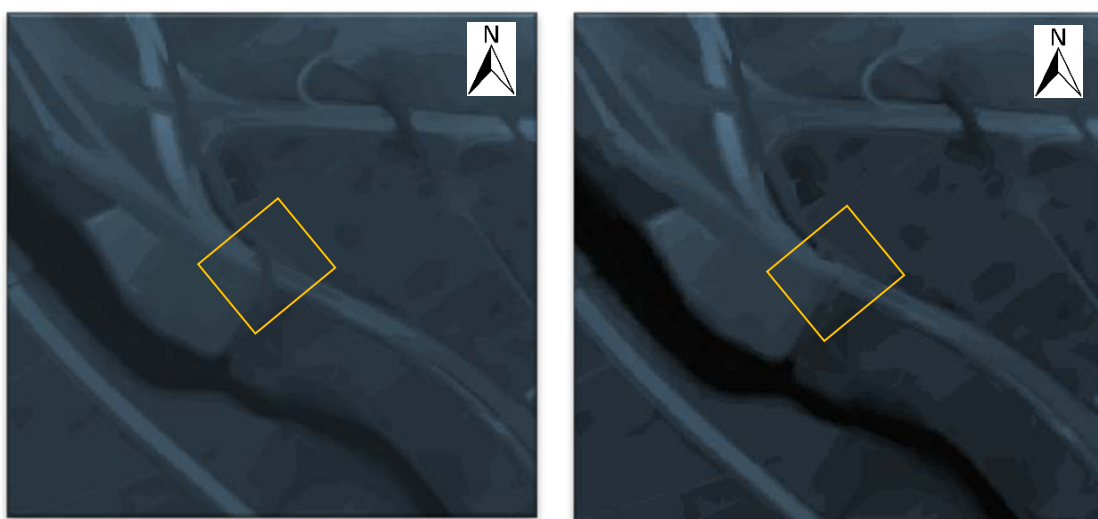


Figura 17. Ráster con la compuerta abierta (izquierda) y con la compuerta cerrada (derecha)

### **3.3.2.2. Puentes- Estructuras transversales**

Tal y como se ha introducido en el apartado “3.3.1.3. *Pilares de los puentes*” hay 4 puentes que cruzan esta zona. Estos puentes son estructuras críticas y singulares que hay que estudiarlas con mucho cuidado. En el apartado anterior se ha indicado como se tratan los pilares de estos puentes en las simulaciones. Con respecto a los tableros de dichos puentes, la autoridad del agua en Cataluña, *l'Agència Catalana de l'Aigua* (ACA), ha realizado análisis en profundidad para saber que les suceden a dichos tableros y los resultados se pueden leer en el documento *Planificació de l'espai fluvial de L'Anoia i el Baix Llobregat*<sup>[14]</sup>. En este documento se dice que los tableros de estos puentes están localizados a una suficiente altura para que en caso de avenida (para  $T=100$ ) el agua no alcanza dichos tableros. Así pues, el hecho de extraer estos tableros de nuestro modelo no supone modificación alguna para nuestro estudio. Esto es una gran simplificación sobre todo para el modelo 2D, ya que la simulación de un puente dentro de una zona 2D es muy compleja. De esta manera, conociendo a priori que los tableros no tendrán ningún efecto, simplemente se han analizado el efecto que tienen de una manera muy sencilla dentro del modelo 1D, ya que es el que permite analizar esto de manera más sencilla. Simplemente se realizará esto para validar que la información de *l'Agència Catalana de l'Aigua* es correcta.

### **3.3.3. Mapa de usos del suelo y Rugosidad**

Para la realización de un estudio de inundabilidad mediante Hec-Ras es necesario disponer de un plano con los coeficientes de rugosidad de toda la zona. Para ello es indispensable definir un mapa de usos de suelo con un número de Manning asociado a cada punto. Para determinar que coeficiente de rugosidad se le asigna a cada punto se ha creado un plano donde se indica qué uso tiene cada zona y posteriormente se ha determinado qué número de Manning tiene asociado cada uso. Para determinar el uso de cada punto, se han visualizado las ortofotos de la zona. Para cada punto, se ha interpretado y definido el uso de la zona en base a sus características. En el siguiente plano, de elaboración propia mediante ArcGis, se puede observar el plano de la zona de estudio con cada uno de los usos que se le ha asignado a cada punto.

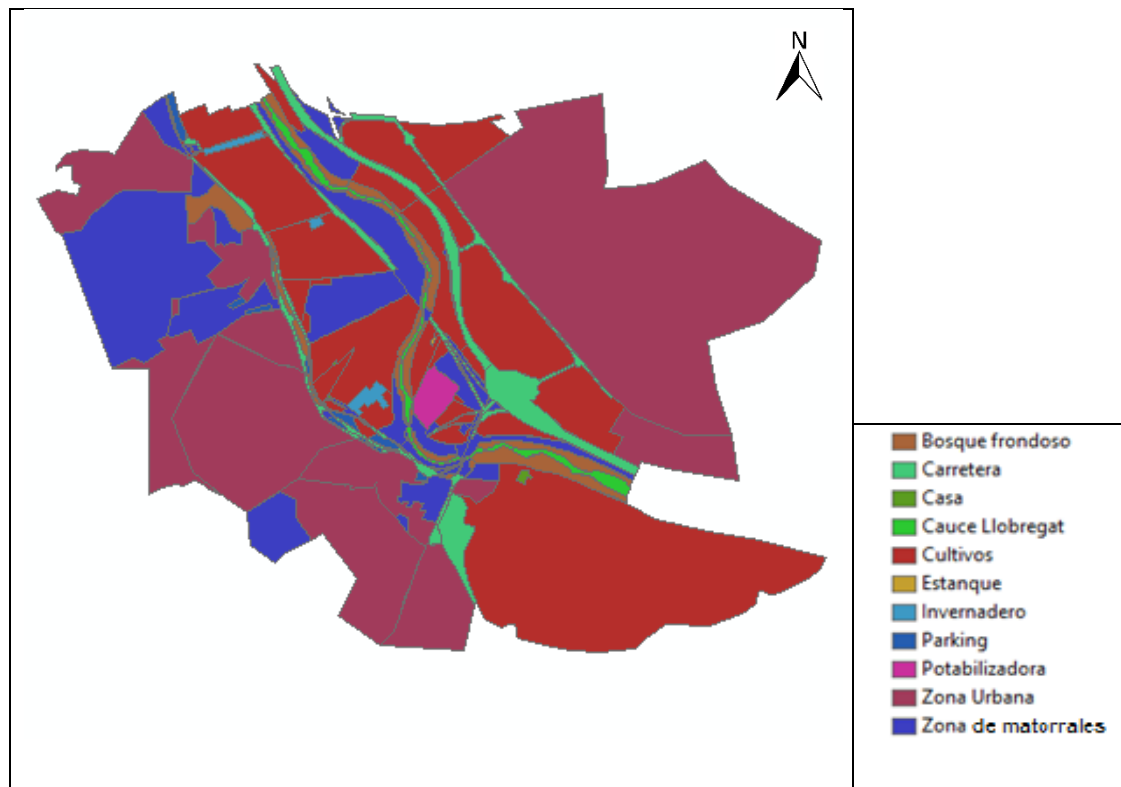


Figura 18. Mapa de usos del suelo (Elaboración propia)

A continuación, es necesario definir qué coeficiente de rugosidad (Número de Manning) se le va a asignar a cada uno de estos usos. Para realizar esta asignación, existen infinidad de tablas y libros donde se definen estos coeficientes. Se utilizará uno de los libros más extendidos y que recomienda Hec-Ras <sup>[15]</sup>, así como ciertas normativas y valores que proponen las autoridades Catalanas. <sup>[16]</sup>

| Uso del suelo      | Número de Manning |
|--------------------|-------------------|
| Bosque frondoso    | 0.075             |
| Carretera          | 0.15              |
| Casa               | 0.15              |
| Cause Llobregat    | 0.03              |
| Cultivos           | 0.04              |
| Estanque           | 0.15              |
| Invernadero        | 0.15              |
| Parking            | 0.15              |
| Potabilizadora     | 0.15              |
| Zona urbana        | 0.15              |
| Zona de matorrales | 0.035             |

Tabla 3. Usos del suelo y su respectivo número de Manning

Finalmente, el resultado es el siguiente mapa de rugosidades, donde se relaciona el plano de usos del suelo con el número de Manning y se asigna a cada punto un coeficiente de rugosidad.

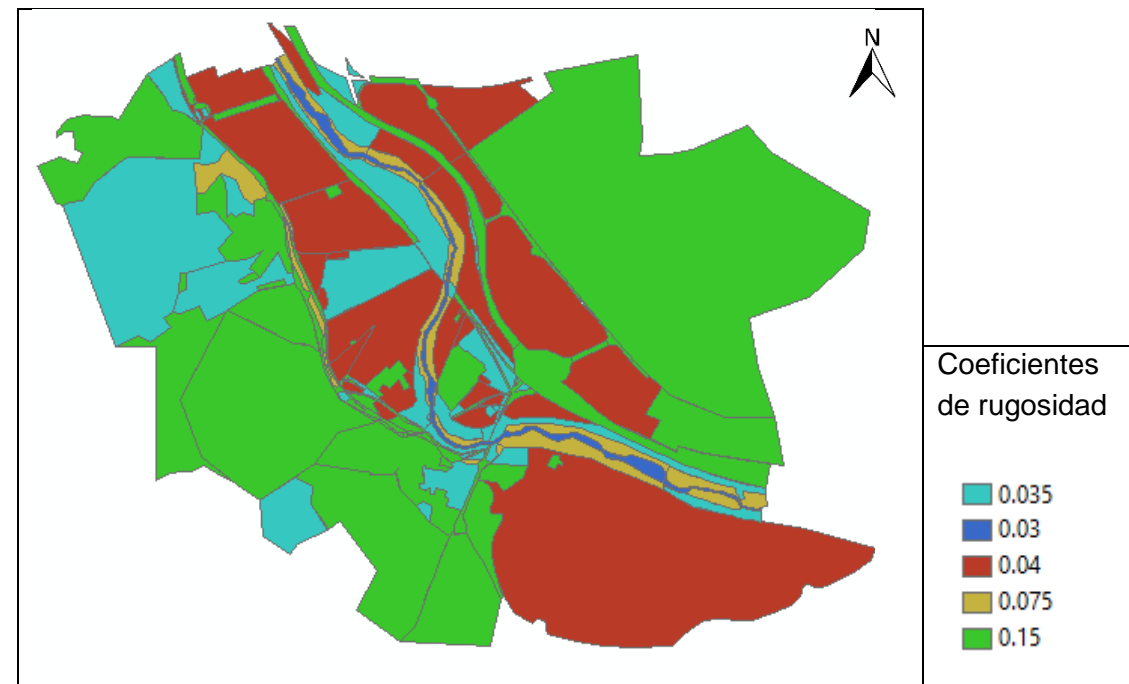


Figura 19. Mapa de rugosidad (Elaboración propia)

#### 3.3.4. Creación de las secciones transversales y del cauce del río

Para realizar la simulación 1D y la simulación cuasi 2D, es necesario conocer y definir una serie de secciones transversales del río Llobregat donde se podrá evaluar los niveles de agua. Para definir estas secciones, la manera más sencilla es utilizar la extensión Hec-GeoRAS de ArcGis. Esta extensión permite crear el cauce del río, sus límites y las secciones transversales que se desea. Finalmente, todos estos archivos y datos se pueden exportar a Hec-Ras. Para evitar ser redundante y exponer información muy básica acerca del funcionamiento de HEC-GeoRAS, se recomienda leer el manual de Hec-GeoRAS<sup>[17]</sup> para solucionar cualquier duda, ya que en el siguiente apartado únicamente se resumirán los puntos más importantes.

Se han creado un total de 73 secciones a lo largo del cauce del río Llobregat intentando respetar las distancias recomendadas para la creación de secciones. Además, se ha limitado el área de inundación mediante las “*flow lines*” y también se han delimitado las “*bank lines*” mediante la superposición de una ortofoto.

El resultado de este trabajo se puede apreciar en la *Figura 20*, donde se pueden ver las secciones creadas en ArcGis y que posteriormente se exportaran a Hec-Ras. La información que se ha utilizado para generar la TIN necesaria para obtener la forma de las secciones transversales es la del MDT 5x5, que se ha descargado de la web del ICC y que ya ha sido modificada y adecuada a la realidad actual tal y como se ha mencionado en apartados anteriores.



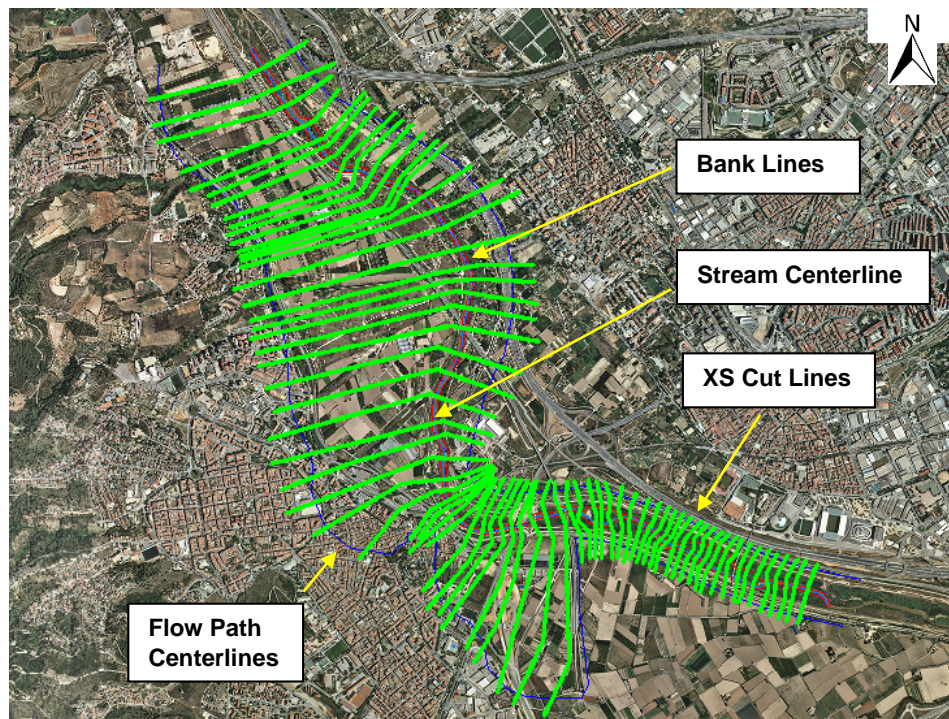


Figura 20. Creación de las secciones transversales para 1D y 1D/2D con ArcGis mediante la extensión Hec-GeoRas

### 3.3.5. Archivos exportados a Hec-Ras 5.0

Así pues, recapitulando, después de realizar las modificaciones del ráster original, crear el mapa de rugosidad y crear las secciones trasversales mediante Hec-GeoRas, se han generado una serie de archivos que se deben exportar a formatos que permitan su apertura en Hec-Ras. Los archivos exportados son:

- Un archivo relativo al MDT original: el archivo de formato *.txt*, que contiene la información del MDT, y que se ha de transformar en un archivo con formato flotante (*.flt*) para que se pueda abrirlo Hec-Ras. Este archivo contiene la elevación del terreno original.
- Un archivo relativo al MDT modificado: el mismo procedimiento que en el archivo anterior, pero esta vez sobre el MDT que se ha modificado y ajustado. Por lo tanto, se transformará el archivo ráster en un archivo con formato flotante (*.flt*).
- Un archivo que contenga el mapa de rugosidad: Se exportará un archivo con la extensión *.hdf*, el cual contiene el mapa de rugosidad con los coeficientes pertinentes.
- Un archivo que contenga las secciones transversales, el canal principal del río, la distancia entre las secciones, los *Leeves*, las estructuras laterales... Toda esta información está contenida en un archivo con formato *.sdf*

## 3.4. Hidrología

Un hidrograma es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna variable hidrológica, como por ejemplo el nivel de agua, el caudal o la carga de sedimentos para

un canal, arrollo o río. En el presente trabajo se hará uso de un hidrograma de caudal, el cual muestra la relación entre el caudal y el tiempo asociado a un tiempo de retorno. Para este trabajo se han realizado cálculos sobre los periodos de retorno de  $T=100$  años y  $T=10$  años. Estos hidrogramas de caudal se utilizarán como condiciones de contorno aguas arriba tal y como se han introducido en apartados previos. Teniendo en cuenta estos puntos, será necesario disponer de un hidrograma de caudal del río Llobregat en la sección o la zona localizada más aguas arriba. En los siguientes párrafos, se explicará cómo se ha obtenido la información hidrológica necesaria para nutrir al programa Hec-Ras.

La metodología óptima para la obtención de los hidrogramas, sería la realización de un estudio completo de prácticamente toda la cuenca del Llobregat, ya que la sección donde se aplica el hidrograma se encuentra prácticamente en la desembocadura del río. El objetivo de este trabajo no es la realización de este estudio, por lo que se ha intentado encontrar información fiable sobre un hidrograma del Llobregat en alguna zona cercana y que por lo tanto se puede utilizar. Para ello, se ha buscado algún tipo de información o estudio realizado por l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA). Esta entidad proporciona dos tipos de información relativos al caudal en nuestra área de estudio. Esta información se utilizará para desarrollar el hidrograma.

- Información sobre el caudal máximo: en la página oficial de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) <sup>[18]</sup>, se puede encontrar el valor máximo del caudal en la zona del meandro de *Sant Boi de Llobregat*, no obstante, no será suficiente este valor ya que queremos realizar el estudio en régimen no permanente y por lo tanto necesitamos el caudal a lo largo del tiempo y no únicamente el caudal punta. Sin embargo, este caudal nos servirá para ajustar el hidrograma que se también proporciona esta organización.
- Hidrograma del río Llobregat: en el documento "*Planificació de l'espai fluvial de L'Anoia i el Baix Llobregat*", realizado por l'Agència Catalana de l'Aigua <sup>[14]</sup> se puede encontrar mucha información acerca de esta zona, entre ella destaca la información relativa a un hidrograma de esta zona. La *Figura 21* muestra los datos extraídos de este documento.

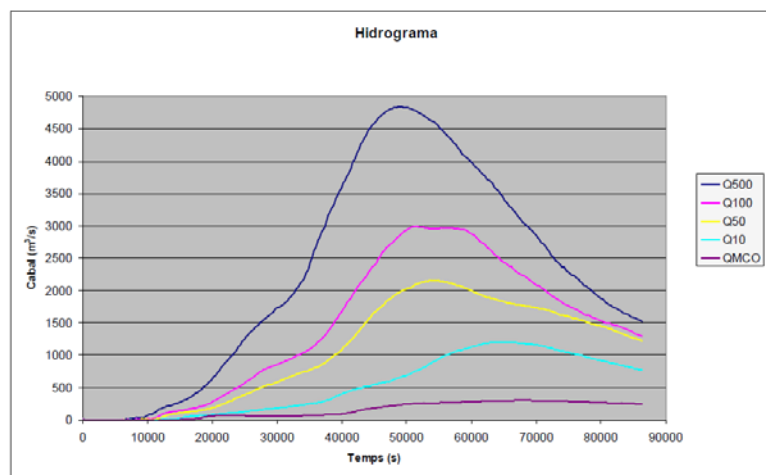


Figura 19 Hidrograma d'avinguda extret de la secció 8638,65

Figura 21. Hidrograma del PEF del Baix Llobregat i l'Anoia



Este hidrograma no es exactamente del punto donde se desea aplicar la condición de contorno, pero si de un área muy cercana. Por lo tanto, ya que el objetivo de este trabajo no es el desarrollo de un hidrograma para una gran cuenca, se utilizará dicho hidrograma ajustado al máximo caudal que se puede ver en la página web indicada anteriormente y que se detalla en la *Tabla 4*. Finalmente, destacar que este documento solo está en versión pdf y no contiene una tabla con los datos numéricos exactos que nos sirva para construir este hidrograma. Así pues, se ha tenido que desarrollar el hidrograma de una manera aproximada, calcando la información. Para que sea más exacto se ajustado el pico del hidrograma a los valores que proporciona la *Tabla 4*, relativos al caudal máximo en este punto. El resultado es un hidrograma muy similar y que nos proporcionara unos resultados excelentes para este tipo de estudios.

| Tiempo de retorno | Caudal punta según l'ACA |
|-------------------|--------------------------|
| 100 años          | 3050 m <sup>3</sup> /s   |
| 10 años           | 1178 m <sup>3</sup> /s   |

Tabla 4. Caudales punta del río Llobregat

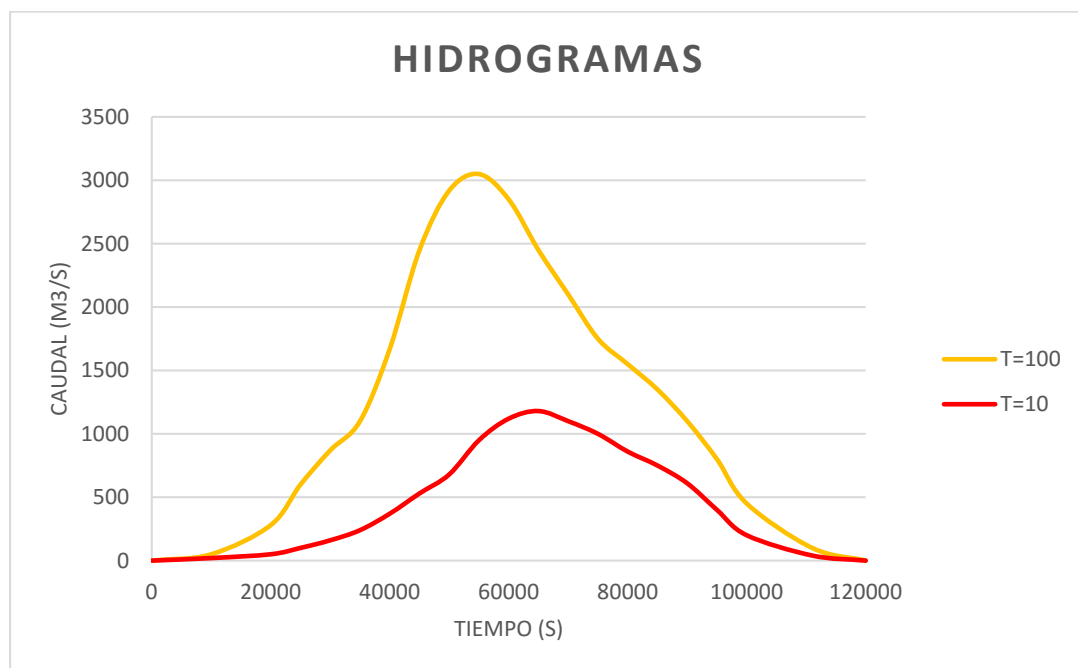


Figura 22. Hidrogramas para T=100 y T=10 años

## **4. Cálculos hidráulicos en el meandro de Sant Boi de Llobregat con Hec-Ras 5.0**

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, el objetivo de este trabajo, una vez se ha estudiado en profundidad el programa Hec-Ras 5.0, es la realización de una simulación hidráulica en el meandro de *Sant Boi* para el río Llobregat utilizando dicho programa y poder analizar cómo se comporta ante un escenario real el modelo. Una vez realizado el trabajo previo con ArcGis, ya se posee todos los archivos necesarios para poder generar un modelo, por lo que en los siguientes apartados se procede a mostrar el proceso de generación y simulación de cada modelo en la zona de estudio para los diversos métodos (1D, 1D/2D, 2D). Se mostrará la metodología seguida para la generación del modelo y algunos de los resultados obtenidos en puntos singulares. También se mencionarán los problemas detectados durante el trabajo y las ventajas de cada una de las metodologías.

### **4.1. Modelización bidimensional (2D)**

Los primeros modelos que se mostrarán son un conjunto de modelos bidimensionales. Esta es la parte más innovadora del trabajo, ya que el poder realizar un modelo 2D con Hec-Ras es algo totalmente nuevo y que nunca se había podido hacer en ninguna de sus versiones anteriores desde el año 1995.

En estos apartados se mostrarán el resultado de 3 simulaciones bidimensionales. Sin embargo, se han tenido que realizar otras 6 simulaciones auxiliares (no se mostrarán explícitamente los resultados) para poder determinar los parámetros adecuados que permiten conseguir modelos estables. La primera simulación que se ha realizado, consiste en coger el terreno original, terreno generado a partir del MDT descargado del ICC sin tratar, y analizar cómo se comporta y cuáles son las modificaciones que se han de realizar sobre el terreno para que funcione correctamente. En segundo lugar, se ha realizado una simulación con el terreno tratado para un tiempo de retorno de  $T=100$  años. Finalmente, se ha desarrollado una simulación para el terreno tratado para un tiempo de retorno de  $T=10$  años.

#### **4.1.1. Desarrollo del modelo 2D**

A continuación, se explicará brevemente cómo se han desarrollado los modelos bidimensionales mediante Hec-Ras 2D. Para la construcción de este modelo, se han seguido una serie de pasos que ayudan al desarrollo de todo modelo hidráulico en Hec-Ras.

##### *1. Paso 1: Pre proceso mediante ArcGis.*

Tal y como se ha descrito anteriormente, el primer paso consiste en realizar un pre proceso mediante ArcGis. Este paso es importante para generar una serie de ficheros que necesitamos como elementos de entrada para que el modelo funcione. Recordando lo que se ha mencionado en el capítulo anterior, para los modelos 2D será necesario un

archivo relativo al terreno en formato flotante (extensión .flt) y un archivo con la información relativa al mapa de rugosidad de la zona. Para las simulaciones se necesitará también dos archivos relativos al terreno. Uno que contenga la información del terreno original y otro archivo con la información del terreno tratada.

## 2. Paso 2: Importación de la información de ArcGis y generación de la geometría.

Una vez se han generado estos archivos en un formato adecuado, se procede a abrirlos desde Hec-Ras. Para abrir el fichero de terreno se ha de ir a la ventana de Ras Mapper y en esa ventana se puede cargar el terreno generado de nuestra zona de estudio y el plano de usos de suelo. Un punto importante que no se puede olvidar, es que se ha de asignar al proyecto un sistema de referencia antes de cargar esta información. En este estudio, se ha utilizado el sistema de referencia espacial ETRS89-UTM-ZONA 31-N. Una vez cargado nuestro terreno y nuestro mapa de rugosidad, tal y como se ha explicado en el *Apartado 2.6*, podremos visualizarlo desde Ras Mapper. La *Figura 23* muestra a la izquierda la visualización del terreno desde Ras Mapper y a la derecha la visualización del mapa de rugosidad del terreno con el fondo de vista de satélite.

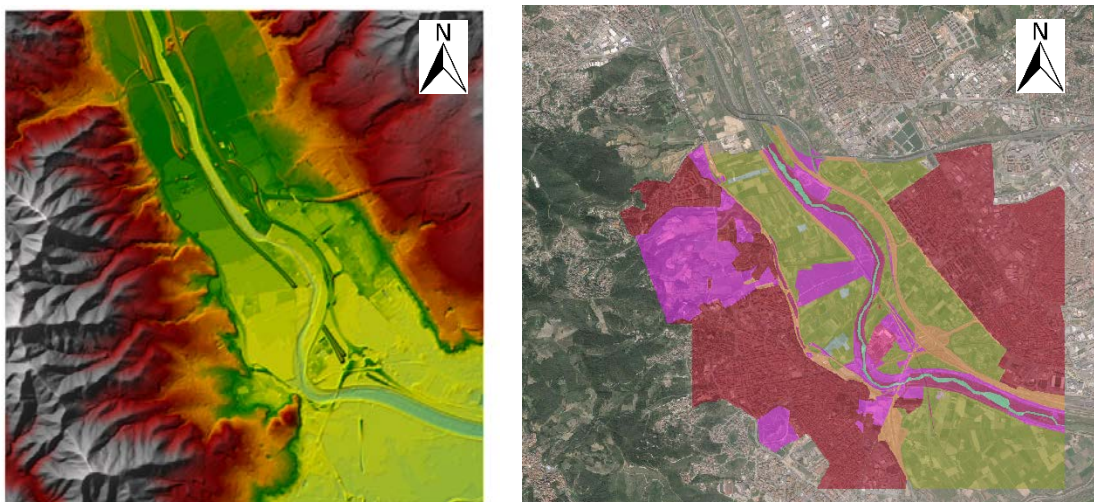


Figura 23. Visualización del terreno (izquierda) y del plano de rugosidad (derecha) desde Ras Mapper

El siguiente paso a realizar, consiste en la generación de la malla sobre la que se realizarán los cálculos. Para ello hay que ir a la pestaña de geometría; una vez en la ventana de geometría, se ha de construir a lo largo de la zona que se desea realizar los cálculos una malla 2D. En este apartado, la malla se ha creado a lo largo de la planicie de inundación y el cauce del río, ya que se desea realizar un estudio de toda la zona complementemente en dos dimensiones. La malla que se ha utilizado es una malla no estructurada ya que Hec-Ras está diseñado para utilizar este tipo de mallas. El tamaño de la malla utilizado es de 10x10, tal y como se justificará más adelante. En la *Figura 24* podemos ver la malla que se ha generado (los cuadrados que se ven de la malla en esta figura no están a tamaño real, son más grandes para una visualización mejor).

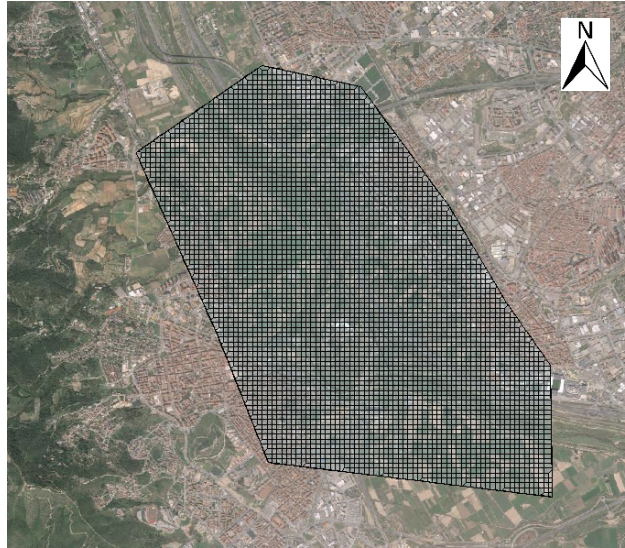


Figura 24. Malla 2D generada

Para tener una mayor precisión en el modelo, se han creado a lo largo del cauce y de algunas estructuras singulares y críticas, como los diques de defensa o los puentes, unas estructuras llamadas “*Break lines*”. Estas estructuras lo que hacen es crear celdas más precisas a lo largo de toda la línea que se genera. Esto resulta de gran utilidad para construir una malla más precisa y con la dirección que deseamos en algunas zonas. La *Figura 25* muestra el resultado y la localización de las “*Break lines*”.

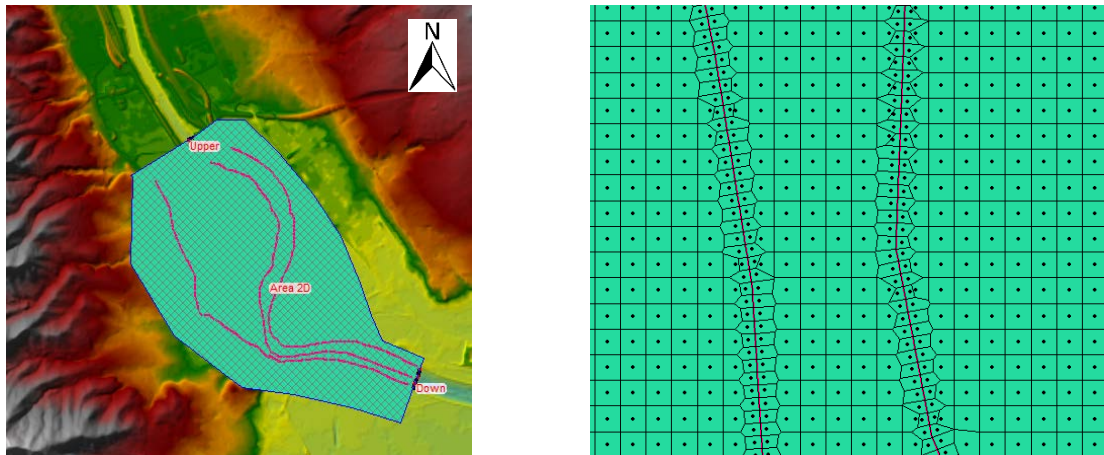


Figura 25. Break lines de la malla 2D

### 3. Paso 3: Condiciones de contorno.

Se ha realizado la simulación en régimen no permanente para obtener unos resultados más precisos y que además permitan una visualización, mediante Ras Mapper, mucho más interactiva y a lo largo un intervalo de tiempo. El régimen no permanente analiza los resultados en función del tiempo a lo largo de un intervalo de tiempo.

Con respecto a las condiciones de contorno. Se han aplicado aquellas mencionadas anteriormente, es decir, aguas arriba se ha introducido un hidrograma de flujo del río Llobregat y aguas abajo una curva de Gasto. En la *Figura 26* se puede ver la ventana de condiciones de contorno para régimen no estacionario.



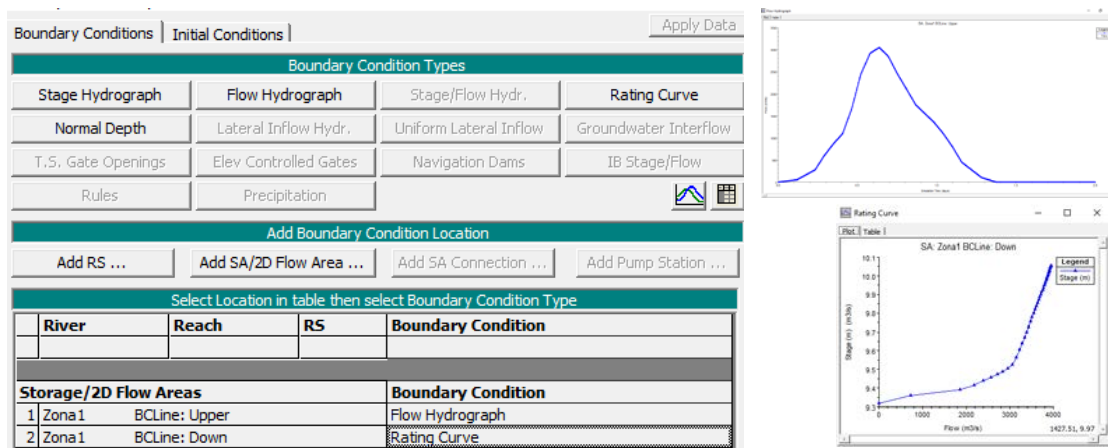


Figura 26. Condiciones de contorno para régimen no permanente (izquierda), Hidrograma para T=100 (derecha superior) y Curva de Gasto (derecha inferior)

Además, hay que destacar que en el modelo bidimensional es necesario introducir e indicar al programa sobre qué celdas y puntos de la malla se aplican estas condiciones de contorno. Las condiciones de contorno aguas arriba se han aplicado en la zona del río y las condiciones de contorno aguas abajo se han aplicado a lo largo de todo el ancho de la zona por donde circulará el agua durante la crecida, es decir, el ancho que marcan las motas que encauzan el río Llobregat en la parte final del río que se analiza.

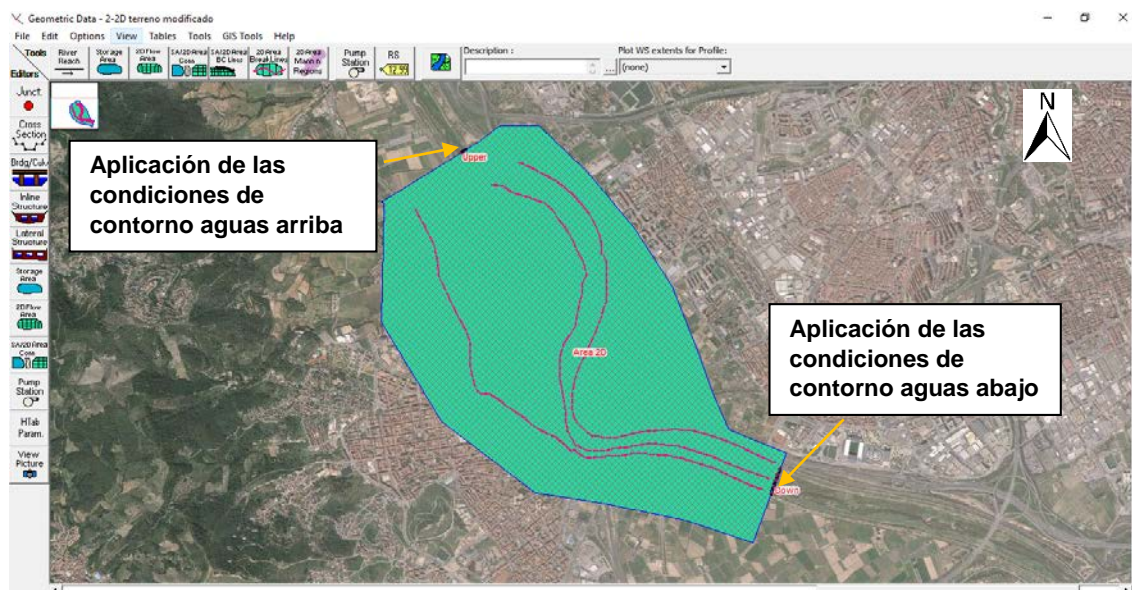


Figura 27. Puntos de aplicación de las condiciones de contorno 2D

#### 4. Paso 4: Simulación.

Finalmente, una vez ya se ha creado la geometría y se han introducido las condiciones de contorno en el programa, procedemos a ir a la ventana de simulaciones en régimen no permanente. En esta ventana, se han de determinar algunos parámetros de tiempos que son necesarios para realizar la simulación. Los parámetros que se han de introducir son los siguientes:<sup>[11]</sup>

- a. Intervalo de tiempo de simulación (*Computation interval*): Este tiempo utilizado en régimen no permanente, es uno de los más importantes ya que de él depende que el modelo funcione correctamente. Este tiempo depende de diversos factores. Primero, debe ser lo suficientemente pequeño como para describir la crecida y decrecida del hidrograma perfectamente. Una regla general sería que como mínimo fuera 1/20 el tiempo en que tarda en producirse el pico del hidrograma. En segundo lugar, este tiempo debe satisfacer la condición de Courant. De este parámetro depende que el modelo sea estable y que aporte unos resultados realistas.
- b. Intervalo de salida del hidrograma (*Hydrograph output interval*): Este parámetro es utilizado para definir qué intervalo de tiempo se escribe en el archivo HEC-DSS con respecto al intervalo de tiempo del hidrograma. Éste tiene que ser igual o mayor que el tiempo de simulación que se haya seleccionado.
- c. Intervalo de la salida del mapa (*Mapping output interval*): este parámetro indica el intervalo de tiempo sobre el que podremos visualizar los resultados en la ventana de Ras Mapper.
- d. Intervalo de salida detallado (*Detailed output interval*): Este parámetro nos indica sobre qué intervalo de tiempo se nos mostrarán los resultados de los perfiles de nivel de agua y caudal. Éste debe ser igual o mayor que el tiempo de simulación. Además, hay que tener una consideración con respecto a este parámetro y es que un aumento de éste, incrementará los recursos del ordenador y por lo tanto aumentará el tiempo de ejecución del modelo.

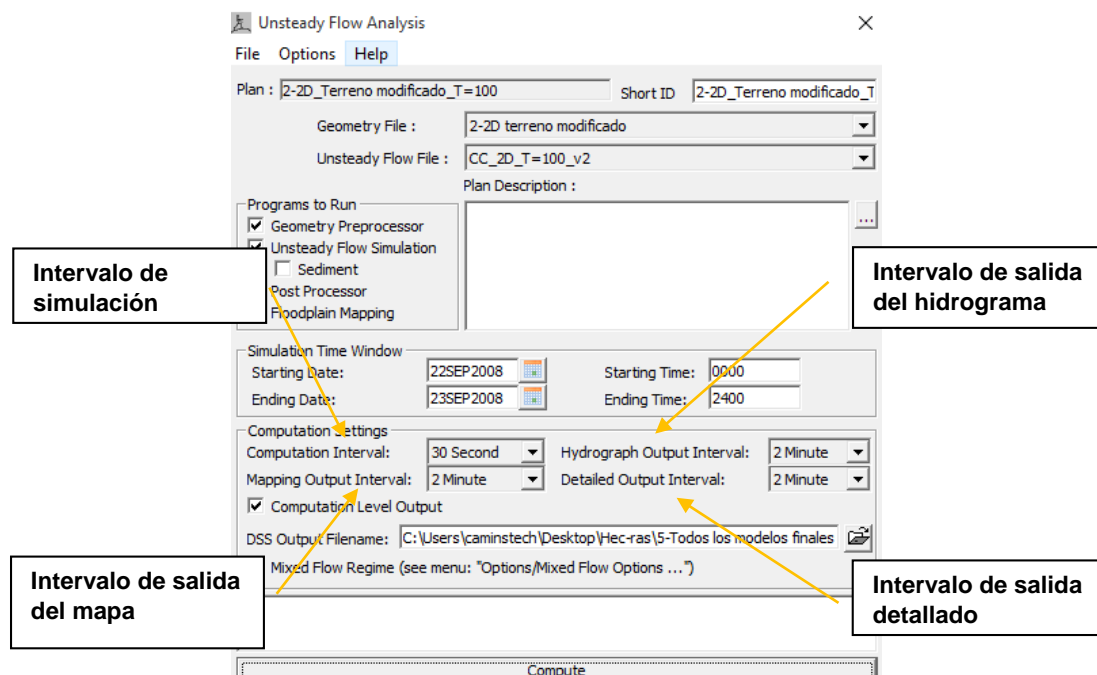


Figura 28. Ventana de "Unsteady Flow Analysis"

Para desarrollar el modelo correctamente y obtener los mejores resultados, se han dedicado muchos recursos a la determinación y la obtención de los parámetros más adecuados. Especialmente a encontrar qué tiempo de intervalo de simulación se ha de aplicar. A continuación, se explicará la metodología seguida para determinar qué parámetros son los adecuados para un periodo de retorno de  $T=100$  años, que es el

periodo de retorno que simula una inundación. Para el tiempo de retorno de T=10 años se utilizarán estos mismos parámetros para simplificar el estudio, ya que T=100 años representa el escenario más desfavorable, y si es estable para este escenario, también lo será para T=10 años con los mismos parámetros.

La simulación se realiza sobre un total de 48 horas, tiempo suficiente para poder ver la crecida y decrecida del río Llobregat. El pico del hidrograma para T=100 años se produce a los 55 000 segundos (15,27 horas) del inicio del evento. Por lo tanto, dos días de simulación resultada un intervalo lo suficientemente holgado como para ver toda la duración de la avenida y nos permite ver el momento que más interesa, que es el momento en el que se producen los niveles máximos.

Con respecto al tiempo de salida del hidrograma, la información del hidrograma se ha construido a partir de un hidrograma de 2 minutos. Por lo tanto, un tiempo de 2 minutos es acorde a la información de partida. Para tener unos resultados que permitan una buena visualización en Ras Mapper, se optó por utilizar un intervalo de salida del mapa de 2 minutos.

Con respecto al tiempo de simulación, tiempo clave para obtener unos resultados estables, se buscó el tiempo óptimo en relación al tamaño de celda. Se probó con celdas de 10 metros y 5 metros, ya que, al tener una información de partida del terreno con una resolución de 5 metros, pareció que ambos tamaños de celda proporcionarían buenos resultados. Así pues, se construyeron una serie de modelos y se simularon para diferentes intervalos de simulación. Las simulaciones que se han realizado son las siguientes:

| <b>Tamaño de la celda (m)</b> | <b>Intervalo del tiempo de simulación (segundos)</b> | <b>Duración de la ejecución del programa (horas:minutos:segundos)</b> | <b>Estabilidad</b> |
|-------------------------------|--|---|--------------------|
| 10x10                         | 120  | 0:44:47   | Inestable          |
| 10x10                         | 60   | 1:21:58   | Inestable          |
| 10x10                         | 30   | 1:38:55   | Estable            |
| 10x10                         | 10   | 3:36:22   | Estable            |
| 5x5                           | 30   | 20:30:16  | Inestable          |
| 5x5                           | 10   | 29:31:09  | Estable            |

Tabla 5. Parámetros del intervalo de simulación en relación al tamaño de malla

Algunas de estas simulaciones, por ejemplo, para una celda de tamaño 10x10 metros, con un intervalo de simulación de 120 segundos, se puede comprobar rápidamente observando la mancha de inundación, que el resultado es completamente inestable, ya que se inundan zonas que no deberían estar inundadas y proporcionan unos niveles de agua y caudales muy elevados. También hay que tener en cuenta que la celda de 5x5 metros necesita unos tiempos de ejecución del programa mucho más elevados que la celda de 10x10 metros, lo que también resultó algo muy negativo. En la *Figura 29* se puede ver algunas de estas manchas de inundación para diferentes intervalos de simulación y diferentes tamaños de celda y descartar aquellas totalmente inestables.

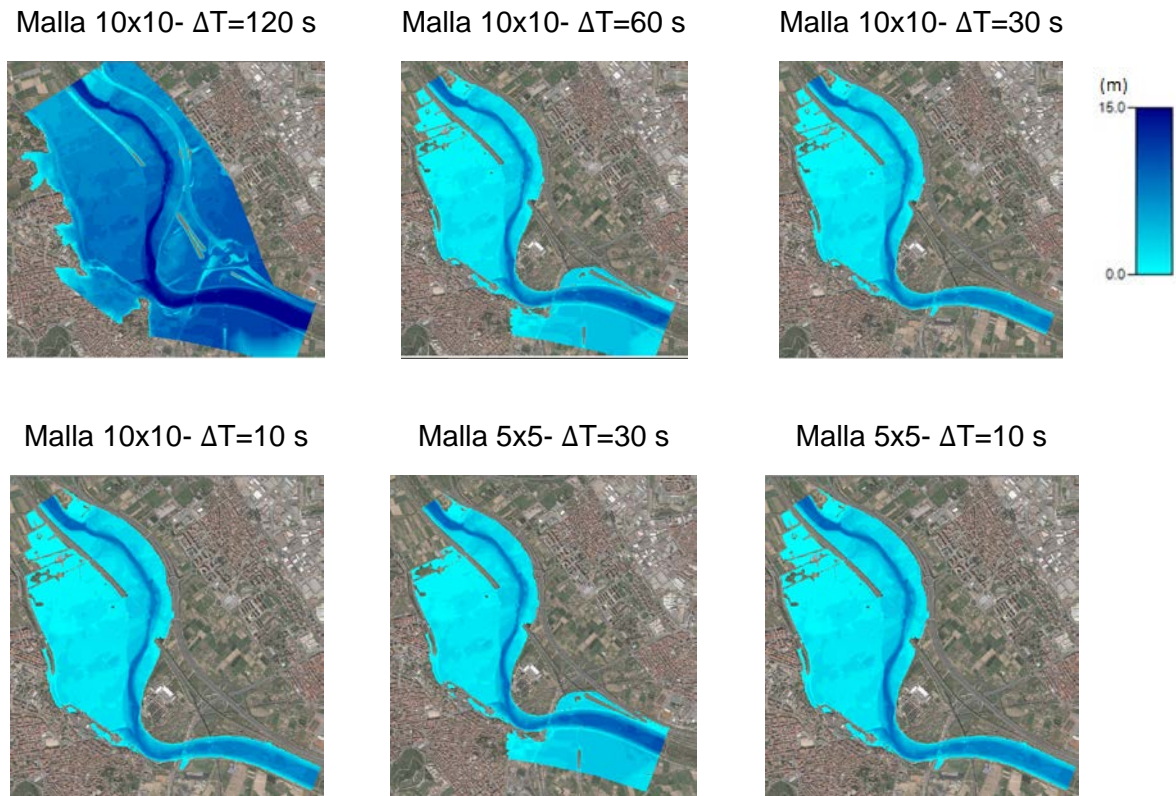


Figura 29. Manchas de inundación para diversos intervalos de simulación ( $T=100$  años)

Después de analizar las manchas de inundación y descartar aquellos tiempos que nos proporcionan resultados falsos, procedemos a analizar los diferentes modelos en función de una gráfica que relaciona el nivel de agua con el tiempo en un punto que se ha seleccionado y se ha utilizado como punto de control. Este punto de control que se ha utilizado es el llamado “Punto 1”, cuya ubicación queda refleja en la *Figura 58*. El objetivo de esta gráfica es comprender cómo varía el calado, para cada intervalo de tiempo, y analizar a partir de qué tiempo de simulación estos resultados ya son prácticamente iguales y los niveles máximos no aumentan o disminuyen y que por lo tanto una reducción del tiempo de simulación o variación del tamaño de malla no tiene ningún efecto sobre los niveles de agua que se obtienen. La *Figura 30* muestra los resultados que se han obtenido en este punto de control.



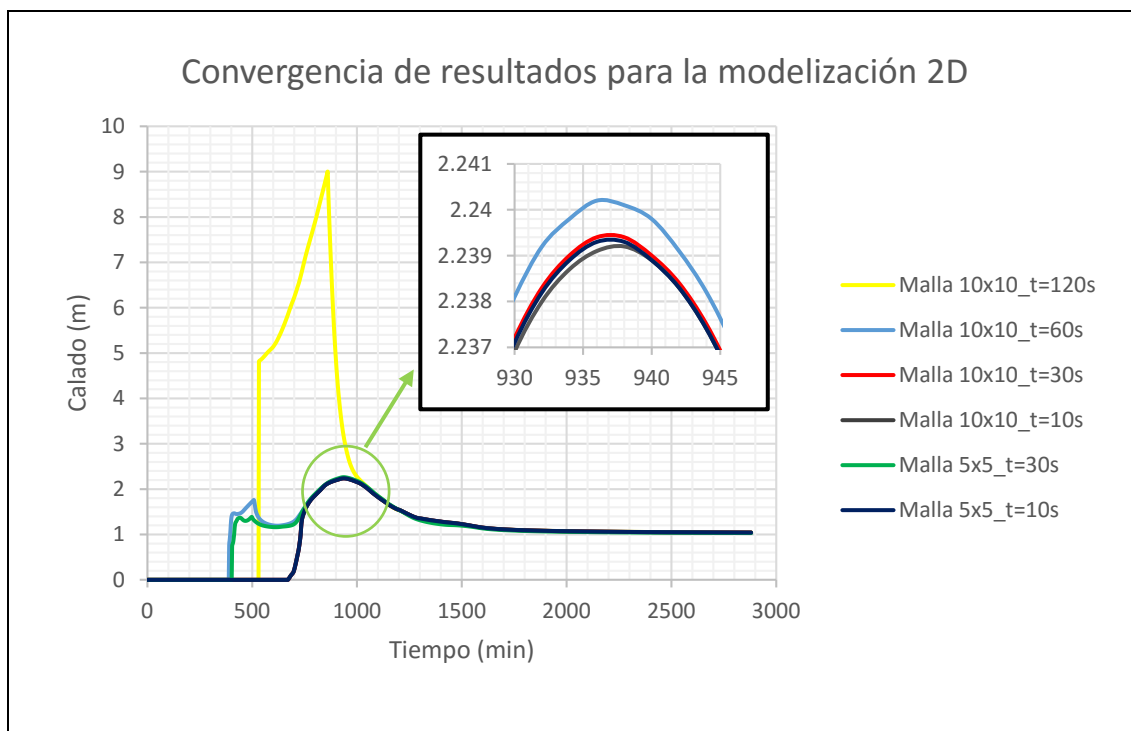


Figura 30. Nivel de agua en un punto de control para los diferentes intervalos de simulación

| Tamaño de la celda (m) | Intervalo del tiempo de simulación (segundos) | Calado máximo (m) | Incremento de tiempo, después del inicio de la simulación, en la que se produce el máximo |
|------------------------|---|-------------------|---|
| 10x10                  | 120   | 9.0027            | 860 min/14 horas y 20 min   |
| 10x10                  | 60  | 2.2402            | 936 min /15 horas y 36 min  |
| 10x10                  | 30  | 2.2394            | 936 min /15 horas y 36 min  |
| 10x10                  | 10  | 2.2392            | 938 min /15 horas y 38 min  |
| 5x5                    | 30  | 2.2630            | 936 min /15 horas y 36 min  |
| 5x5                    | 10  | 2.2393            | 936 min /15 horas y 36 min  |

Tabla 6. Calados máximos según el intervalo de tiempo de simulación

Si se analizan los resultados de esta gráfica y tabla, se puede ver que para celdas de tamaño 10x10 metros y tiempos de simulación de 120 y 60 segundos, los resultados son inestables. Este hecho ya lo habíamos podido detectar mediante las manchas de inundación observadas en la *Figura 30*. Por lo tanto, estos tiempos quedan descartados. A partir de 30 segundos las curvas son muy semejantes y aunque disminuyamos el tiempo de simulación el resultado apenas varía. El programa nos ha proporcionado 4 cifras decimales en los resultados, pero el nivel de precisión para este trabajo no es tan elevado, ya que existe un error mucho más elevado asociado a la generación del terreno. Por lo tanto, si consideramos una precisión de centímetros, que es con lo que se está trabajando para el desarrollo del modelo y proporcionar resultados, se puede considerar que los resultados son iguales a partir de un intervalo de tiempo de simulación de 60 segundos para celdas de 10x10 metros y de 10 segundos para celdas de 5x5 metros. Finalmente, con todos estos datos, se ha seleccionado un intervalo de

tiempo de 30 segundos y una malla de celdas de 10x10 metros, ya que no se dispara tanto el tiempo de ejecución del programa. Con todos estos parámetros mencionados, se asegura estabilidad para el modelo y los cálculos.

#### 4.1.2. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D

Una vez ya disponemos de los parámetros adecuados y todos los datos necesarios para ejecutar el modelo, podemos realizar la simulación. En el siguiente apartado se muestran los resultados que se pueden visualizar en Ras Mapper para las tres simulaciones que se han realizado bidimensionalmente. Los resultados que se mostraran en este apartado son los planos de inundación, con sus respectivos niveles de agua y los planos de velocidad. Hay que recordar que la simulación está realizada en régimen no permanente, por lo que se tiene acceso a la secuencia de inundación cada 120 segundos para todos los resultados.

##### 4.1.2.1. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D sobre el MDT original para T=100 años

La primera simulación que se muestra es la relativa al terreno construido a partir del MDT original, sin tratar, para un periodo de retorno de T=100 años. Tal y como se puede ver en la *Figura 31*, la mancha de inundación que se genera con esta información no se ajusta a la realidad. Los resultados indican que el agua se escapa e inunda algunas zonas, donde se ha podido comprobar mediante fotografías y bases topográficas, que existen grandes diques que protegen estas zonas contra inundaciones. Estos resultados nos llevan a la conclusión que hay una serie de infraestructuras que no han quedado reflejadas en el MDT. La *Figura 31* muestra los resultados del nivel máximo de agua sobre el terreno.

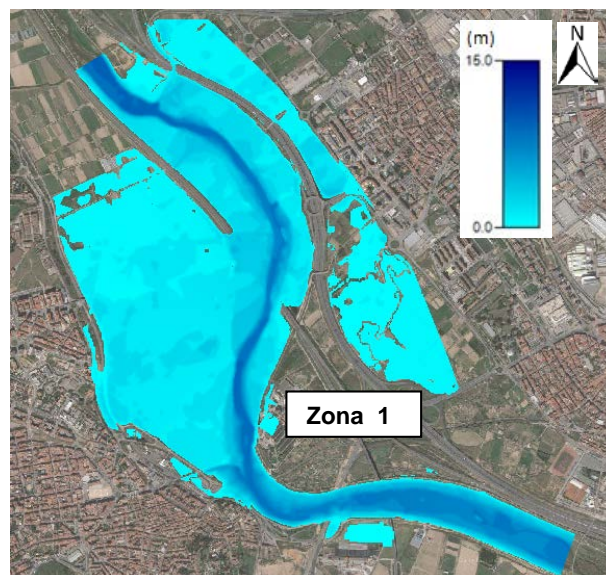


Figura 31. Nivel de agua para el MDT original (T=100 años)

Si se analiza en profundidad alguna de estas zonas, por ejemplo, la zona de la potabilizadora de agua (Zona 1), se puede ver que estos resultados no tienen sentido.

Acorde al modelo desarrollado, esta zona se inunda. Sin embargo, esto no es posible, porque existe un dique que la protege. Este dique alcanza más de 8 metros por encima del nivel del río y tiene una altura de 2 metros sobre el terreno donde se encuentra. Según los resultados que se muestran en la *Figura 32*, el nivel de agua en un punto situado al lado de donde se ubica el dique de protección es de 1.43 metros sobre el terreno. Esto es un sin sentido, ya que, si tenemos un dique con una cota superior a 2 metros, no es posible que el agua llegue a la zona posterior de la infraestructura de protección. Por lo tanto, no es posible que se inunde la zona de la potabilizadora. Teniendo todo esto en cuenta, llegamos a la conclusión que para realizar una buena simulación se ha de modificar el MDT, ya que hay información que no queda reflejada en este archivo y se generan áreas de inundación ficticias.

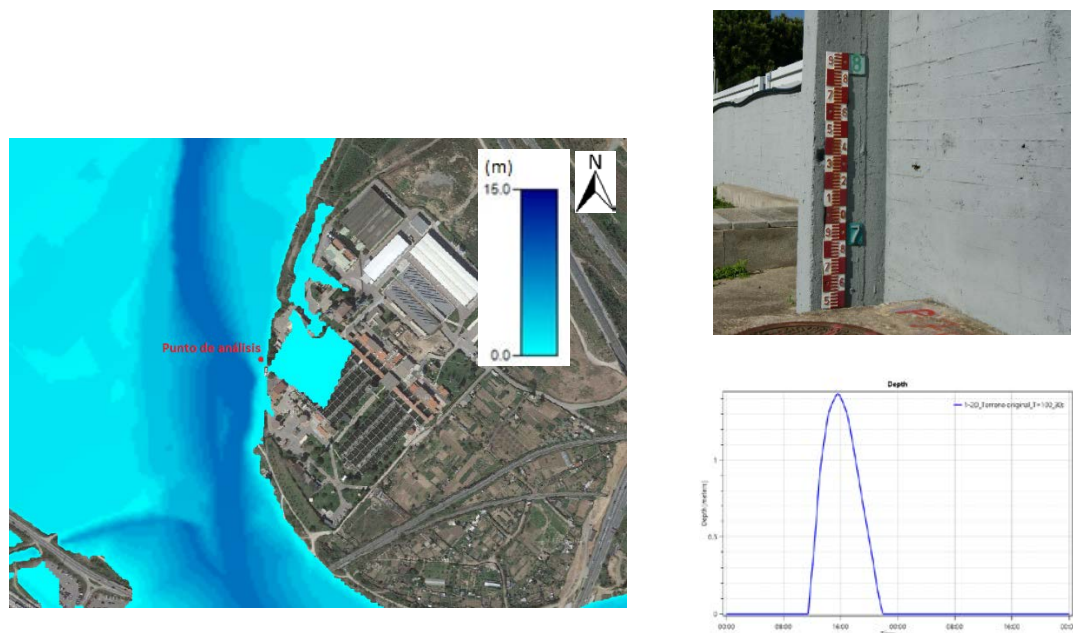


Figura 32. Detalle de zona de inundación de la potabilizadora sobre MDT original

#### 4.1.2.2. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D sobre el MDT tratado para T=100 años

Una vez analizado y concluido que debemos modificar el terreno, se ha simulado una inundación para un periodo de retorno  $T=100$  años sobre el terreno tratado, modificado y ajustado a la realidad actual y cuyas modificaciones y como se han realizado, se han explicado en el capítulo anterior. Sobre el terreno tratado, se esperan unos resultados muy diferentes respecto la simulación anterior, donde ahora el agua no atraviesa los diques que protegen la potabilizadora ni desborda sobre la carretera C-245 y sus accesos ya que estos también están protegidos por elementos de defensa. Además, en la zona de aguas abajo de nuestra zona de estudio, existen motas en ambos lados del cauce del río, por lo que el agua debería quedar totalmente encauzada dentro de esta zona. La *Figura 33* muestra los resultados del nivel de agua para  $T=100$  años para diversos momentos de tiempo del desarrollo del cálculo. La *Figura 34* muestra en detalle los niveles máximos de agua que se alcanzarán en la zona.



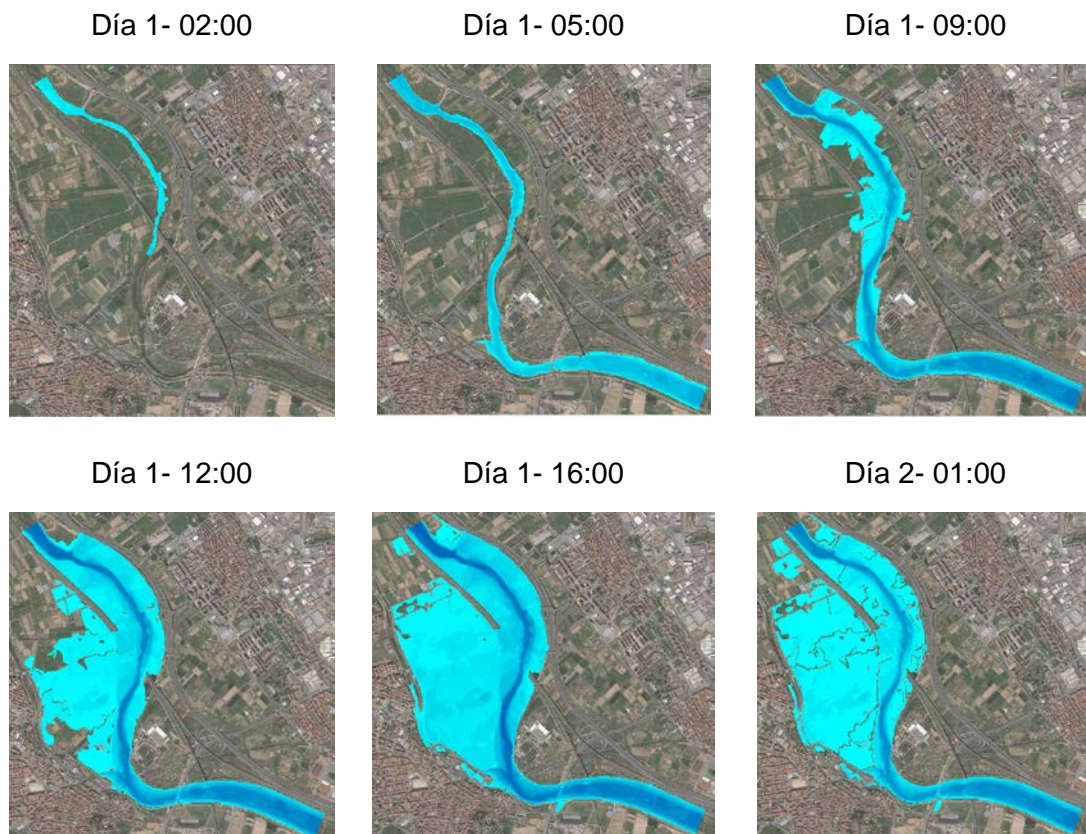


Figura 33. Secuencia temporal de inundación para T=100 años

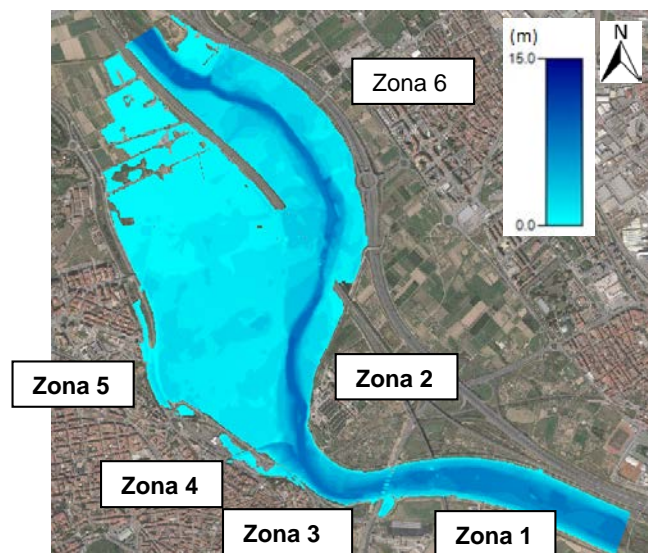


Figura 34. Nivel máximo de agua sobre el MDT tratado (T=100 años)

Como se puede comprobar, la zona baja del río (Zona 1) queda protegida gracias a sus motas y no se inunda. Así pues, el río queda perfectamente encauzado en la parte baja del modelo. Con respecto a la zona donde está ubicada la potabilizadora (Zona 2), también se pueda comprobar que con las modificaciones del terreno ahora no se inunda y sus diques cumplen la función de protección. Por otro lado, las zonas que quedan detrás de los accesos de la carretera C-245 (Zona 3) quedan libres de agua. La Zona 6,

tampoco se inunda, ya que se ha cerrado la compuerta que permitía el paso del agua hacia ese lado, además la zona de la carreta ya no se inunda tampoco.

En la zona 4 podemos ver que el agua cruza la carretera e inunda parte del parking de la estación de ferrocarril. Esto es posible ya que en esta zona no hay dique de protección, y la única protección que hay es una elevación del terreno. Por lo tanto, en caso de una gran avenida parte del agua puede inundar la zona de parking, no obstante, al tratarse de una zona destinada al aparcamiento de coches el daño es menor que si se tratase de una zona urbana. Finalmente, con respecto a la zona 5, según la topografía del terreno existe una zona con un punto más bajo que los que tiene cerca. Esto provoca que exista una zona que permite que el agua rebose y se inunde parte del otro lado de la carreta. Estos puntos serán analizados con más detalle más adelante. Como comentario final, destacar que los resultados de la mancha de inundación obtenidos están en consonancia con los resultados desarrollados en esta misma zona por *l'Agència Catalana de l'Aigua* <sup>[18]</sup>, por lo que se presupone que estos resultados son correctos.

Finalmente, se ha generado un plano en la *Figura 35* en el cual se muestran los resultados de los niveles de agua discretizados por colores según el intervalo. Este plano resulta más sencillo de visualizar en qué zonas se dan los calados más elevados y por lo tanto existe mayor peligro.

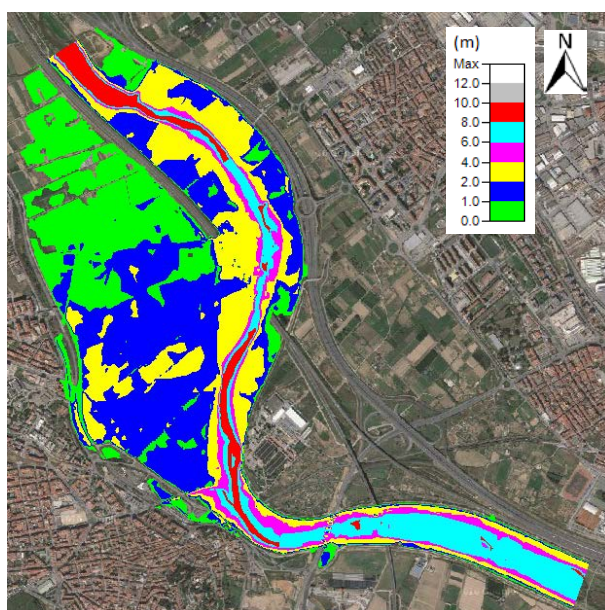


Figura 35. Nivel máximo de agua sobre el MDT tratado (T=100 años)

Con respecto a las velocidades de esta zona, la *Figura 36*, muestra las velocidades que se producen y las direcciones de éstas. Una de las grandes ventajas relativas al cálculo de velocidades es que cuándo modelamos en 2D se pueden visualizar los vectores de dirección de la velocidad. Así pues, los resultados serán mucho más realistas, especialmente en la zona de la planicie de inundación, ya que como vemos en estas zonas los vectores no van en la dirección del cauce del río. Es decir, en esta zona la dirección del agua es lateral y perpendicular al cauce. Este tipo de análisis únicamente es posible realizarlo sobre un modelo bidimensional. En la zona del cauce la dirección dominante es la que sigue el río, por lo que en estos puntos los resultados son más

similares a los de un modelo 1D. Finalmente, destacar que como era de esperar, las velocidades son mucho mayores en la zona del cauce, ya que se tienen mayores profundidades y mayores pendientes, y en la zona de la planicie las velocidades son muy bajas, ya que hay muy poca pendiente y profundidad.

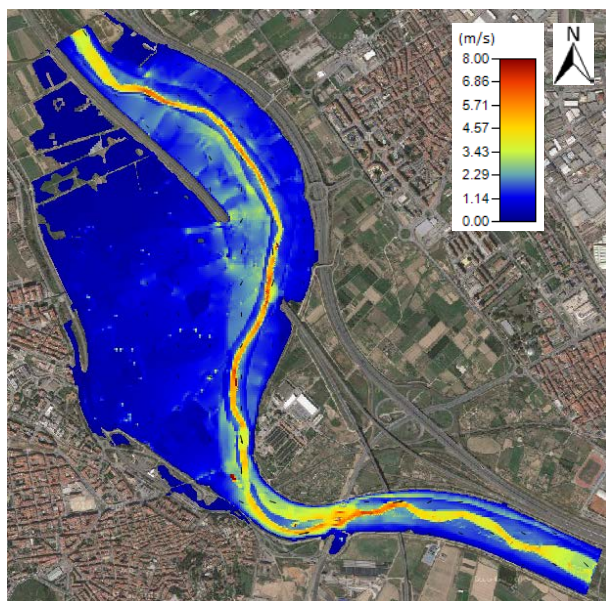


Figura 36. Velocidades del agua sobre el MDT tratado ( $T=100$  años)

#### 4.1.3. Mapa de calados y velocidades para la simulación 2D sobre el MDT tratado para $T=10$ años

Esta simulación presenta un evento con mayor probabilidad de que ocurra, en concreto para un periodo de retorno de  $T=10$  años. El objetivo de analizar este periodo de retorno es ver cómo se comporta el modelo 2D para caudales menores. Además, al tener un menor volumen de agua y por lo tanto menos niveles de agua, es interesante analizar si en este escenario, los modelos bidimensionales presentan las mismas ventajas o inconvenientes que un modelo unidimensional.

Tal y como se ha introducido en apartados anteriores, se utilizarán los mismos parámetros para los tiempos de simulación que en el caso  $T=100$  años. Las condiciones de contorno serán las mismas, pero en este caso se utilizará el hidrograma para  $T=10$  años. La *Figura 37* muestra los resultados de la secuencia temporal del nivel de agua en diversos instantes de tiempo. La *Figura 38* muestra en detalle los niveles máximos de agua que se alcanzan en la zona de estudio.



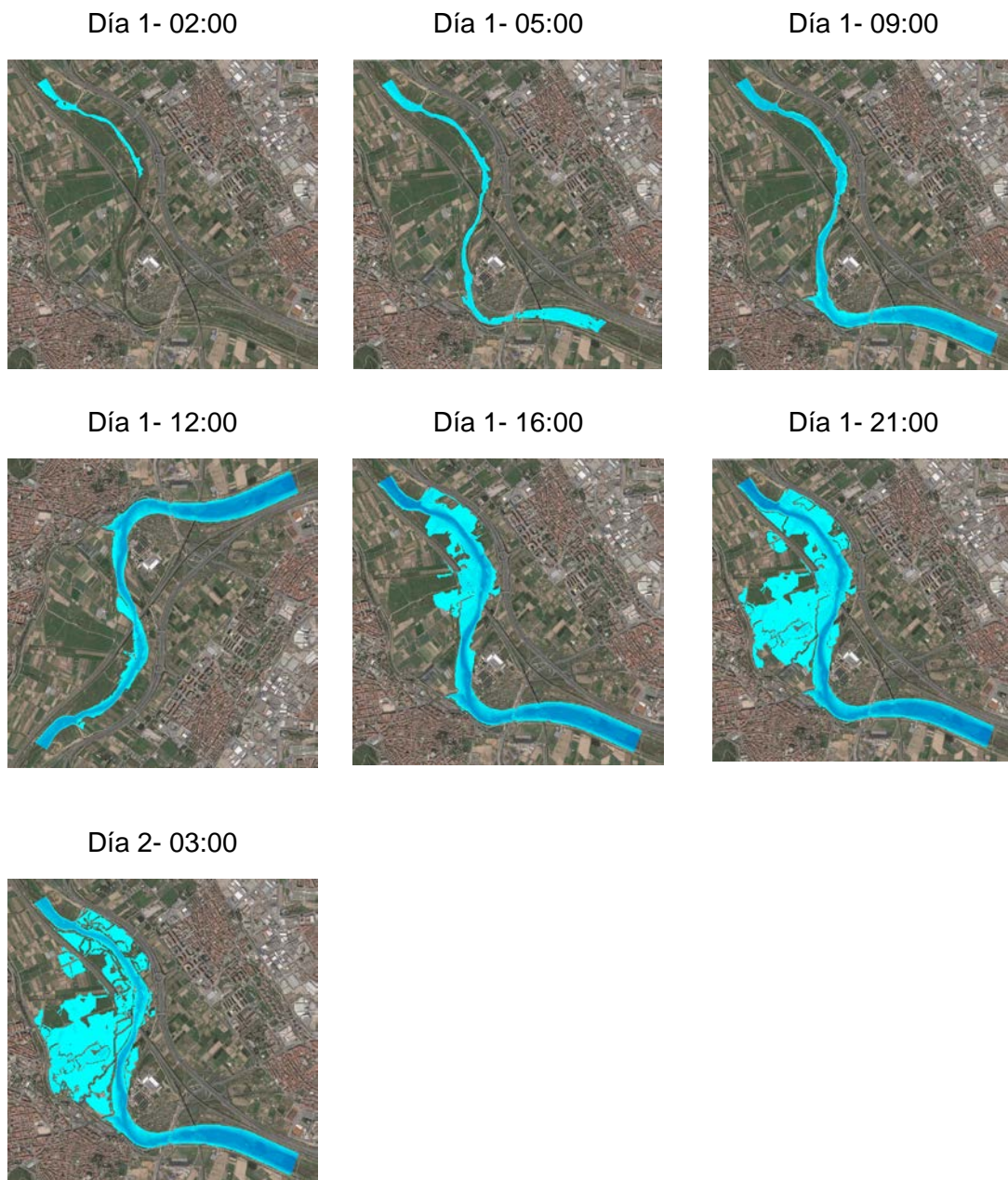


Figura 37. Secuencia de inundación para T=10 años

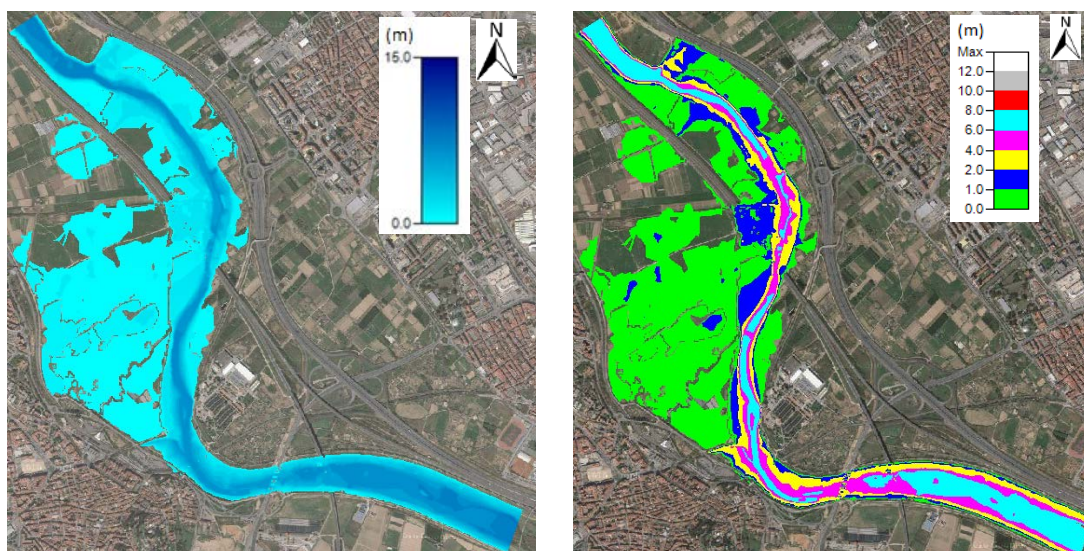


Figura 38. Nivel máximo de agua sobre el MDT tratado (T=10 años)

En este caso, las áreas inundadas son muchas menos y los niveles de agua alcanzados también son más bajos. Los diques de protección también protegen los edificios e infraestructuras críticas y cumplen adecuadamente su función. Con respecto a la planicie de inundación, ésta también se verá inundada en parte. No obstante, hay algunas zonas de esta área que no se inundan, ya que los caudales de agua para este escenario son menores y por lo tanto los niveles de agua menores. Algunas de las zonas más altas de la planicie ahora no serán alcanzadas por el agua.

Con respecto a las velocidades, también se puede verificar que las mayores velocidades se producen en la zona del cauce del río, mientras que en la zona de la planicie de inundación las velocidades son muy bajas. Con respecto a la dirección de la velocidad, ésta tiene la dirección del río en la zona relativa al cauce y una velocidad con una dirección más perpendicular en la zona de la planicie de inundación.

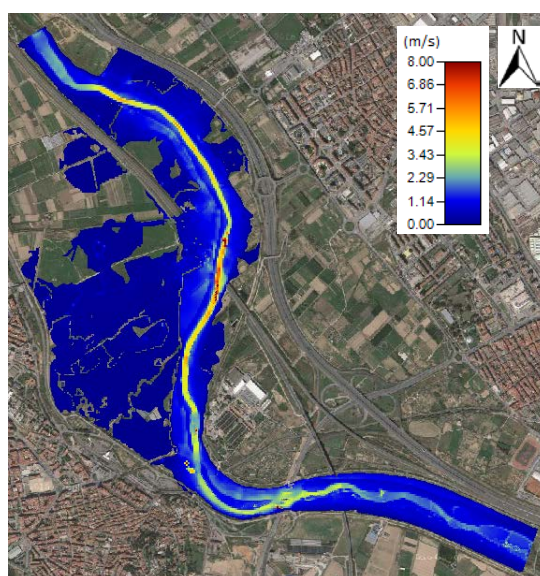


Figura 39. Velocidades sobre el MDT tratado (T=10 años)



#### **4.1.4. Problemas encontrados durante el desarrollo del modelo 2D**

Durante la realización del modelo 2D han aparecido una serie de problemas que han hecho mucho más complejo el desarrollo del modelo. El primero problema ha sido la poca fiabilidad de los datos topográficos descargados, lo cual se ha tenido que solucionar y tratar, lo que ha conllevado un trabajo muy largo y laborioso. Con respecto al desarrollo del modelo, el gran problema ha sido el elevado tiempo de ejecución del programa. En este caso se disponía de un total de 278 000 celdas de 10x10 metros para cubrir toda la zona de estudio. Además, debido a que se ha realizado la simulación para un periodo de dos días, con el fin de poder analizar bien la crecida y bajada del río, los modelos han necesitado horas e incluso días para proporcionar resultados. Esto ha conllevado que cualquier error que se cometiese implicaba la pérdida de muchas horas. Finalmente destacar, que encontrar los parámetros que proporcionaban un modelo estable, ha resultado laborioso y largo, debido a que ha sido necesario desarrollar 6 modelos auxiliares.

## **4.2. Modelización unidimensional (1D)**

### **4.2.1. Desarrollo del modelo**

La segunda simulación que se ha desarrollado ha sido una simulación unidimensional. Este tipo de simulación, es la tipología clásica que ya permitían las versiones anteriores de este programa. El objetivo de la realización de esta simulación es comprobar qué valor añadido tiene un modelo bidimensional y si los modelos 2D proporcionan unos resultados mejores o peores. Además, se analizará en profundidad si los mayores tiempos de simulación que requiere la simulación 2D compensan con respecto a los resultados que se obtienen en el modelo 1D.

Como en apartados anteriores, para el desarrollo de un modelo en Hec-Ras, se deben realizar los siguientes pasos:

#### *1. Paso 1: Pre proceso mediante ArcGis.*

Tal y como se ha introducido anteriormente, lo primero que se ha de realizar es un pre proceso en ArcGis. En este caso, la información que necesitaremos exportar es la relativa a las secciones transversales (*XS Cut Lines*), el canal por donde circula el río (*Stream Centerline*), el límite del cauce del río (*Bank lines*) y el límite de inundación (*Flow Path Centerline*). Tal y como se ha descrito anteriormente, todo ello es muy sencillo de dibujar y desarrollar en ArcGis utilizando la extensión Hec-GeoRas. Una vez ya se ha generado esta información, se exportarán estos archivos a Hec-ras, debidamente georreferenciados, y en unos formatos que se puedan abrir en Hec-Ras.

#### *2. Paso 2: Importación de la información de ArcGis y generación de la geometría.*

Una vez ya en Hec-Ras, lo que se debe hacer es abrir la información que se ha preparado. Lo primero será ir a la ventana de geometría y allá importaremos mediante la opción *File>Import geometry data>Gis format* los archivos. Ahora ya se dispone de todas las secciones y límites necesarios. Para tener unos resultados mejores se ha de

revisar la forma de todas estas secciones y ajustarlas, si fuese necesario, ya que puede haber algunas imprecisiones. Por ejemplo, se puede redondear el lecho del río para darle una forma más realista, ya que éste suele ser plano debido a la manera cómo se ha realizado la medición del MDT. También se ha de limitar por donde circula el agua en el modelo, esto se realiza mediante la opción *Levee*. Esta opción permite indicar al programa la cota que ha de superar en un punto el agua para rebosar e inundar el otro lado donde se encuentra el *Levee*. Ajustar la zona de análisis mediante esta opción es muy importante, ya que hay muchos diques y obstáculos en nuestra área y por lo tanto si no se ajustan las secciones mediante esta función, se generarán resultados falsos. Una vez realizados estos ajustes, se obtiene la geometría que permite realizar los cálculos.

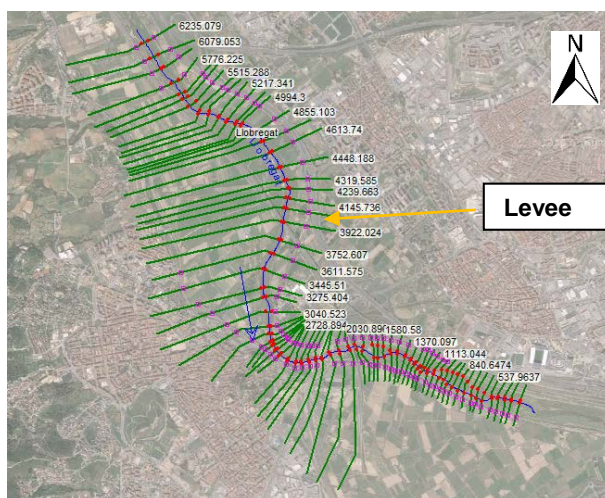


Figura 40. Importación de la geometría a Hec-Ras para 1D

A continuación se procederán a crear los puentes desde la opción de geometría de Hec-Ras. Como se ha mencionado anteriormente se comprobará mediante la simulación 1D que los resultados de l'ACA, que afirman que el agua no alcanza los tableros de los puentes, es efectivamente la que se nos produce en nuestro escenario y que por lo tanto es una hipótesis válida.

Lo primero que se ha de mencionar, es que, debido a la falta de información exacta y fiable respecto a las medidas de los puentes, estas infraestructuras se han creado en el modelo de una forma aproximada a partir de las mediciones realizadas en la visita a la zona de estudio. La creación de los puentes se realizará mediante la opción de Hec-Ras "*Create Bridge or culvert*" de la ventana de geometría. En esta ventana es necesario indicar tanto las medidas como la cantidad de pilares que tiene cada puente, así como sus tamaños. La *Figura 41* muestra la ventana de Hec-Ras donde se han construido los puentes. Recalcar una vez más que por falta de recursos y de información las dimensiones del tablero, la altura del puente y el tamaño de los pilares, se han introducido de forma aproximada basándose en mediciones realizadas insitu y mediante los datos de la base topográfica de la zona 1:5 000. Los resultados obtenidos se expondrán en el apartado 4.2.2. *Resultados de la modelización de los puentes*.

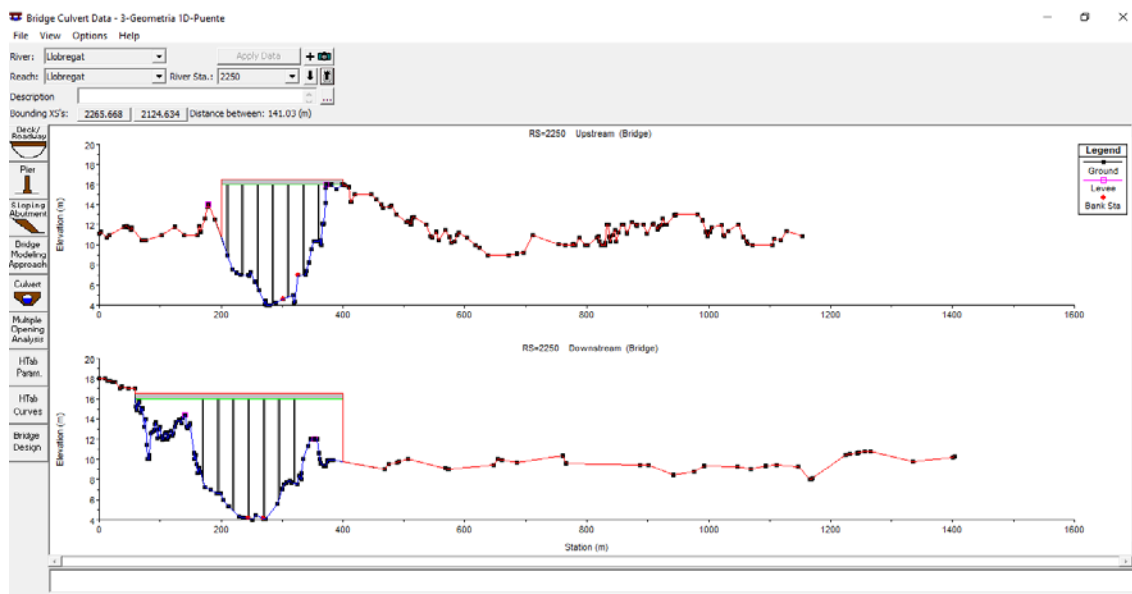


Figura 41. Herramienta de Hec-Ras para la creación de puentes

### 3. Paso 3: Condiciones de contorno.

Como en los apartados anteriores, se ha decidido realizar la simulación en régimen no permanente para obtener unos resultados más completos e interactivos.

Con respecto a las condiciones de contorno. Se han aplicado aquellas mencionadas en secciones anteriores, es decir, en la sección de aguas arriba se ha introducido un hidrograma de flujo del río Llobregat y en la última sección aguas abajo se ha aplicado la condición de calado normal.

### 4. Paso 4: Simulación.

Finalmente, una vez creada la geometría e introducidas las condiciones de contorno en el programa, procedemos a ir a la ventana de simulaciones en régimen no permanente para seleccionar qué parámetros se han de introducir.

En este caso, al ser un modelo unidimensional, se requiere menos tiempo para realizar cada simulación, por lo tanto, se podría reducir mucho el tiempo de simulación y aun así finalizar la simulación en pocos minutos. Esto facilita mucho el trabajo de comparación entre los diversos modelos. Como en el apartado anterior, se han realizado varias simulaciones para varios parámetros con el objetivo de encontrar unos valores que proporcionen unos resultados fiables y estables. Las simulaciones que se han realizado están descritas en la *Tabla 7*. Tal y como se ha comentado, el hecho que más difiere con respecto a los modelos 2D, es que ahora los tiempos de ejecución del programa son del orden de minutos mientras que en el 2D eran de horas.

| Intervalo del tiempo de simulación | Duración de la ejecución del programa | Estabilidad |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| 120 segundos                       | 9 minutos 2 segundos                  | Estable     |
| 60 segundos                        | 7 minutos y 41 segundos               | Estable     |
| 30 segundos                        | 7 minutos 11 segundos                 | Estable     |
| 10 segundos                        | 8 minutos 1 segundo                   | Estable     |

Tabla 7. Parámetros del intervalo de simulación para 1D

Al igual que para el modelo bidimensional, se analizará qué es lo que sucede y cómo varían los niveles de agua a lo largo del tiempo para un punto de control (el mismo punto que para el modelo 2D). La *Figura 42* muestra esta gráfica que relaciona el nivel de agua con el tiempo para el punto de control.



Figura 42. Nivel de agua en el punto 1 para los diferentes intervalos de simulación

En este caso, se puede comprobar que para estos tiempos que se han probado, todos los resultados son estables. Además, el valor máximo entre los modelos prácticamente no varía. Para una precisión de centímetros, se tiene que los cuatro niveles máximos de agua son iguales. Por lo tanto, cualquiera de los tiempos que se han probado proporcionaría unos resultados correctos. Se ha optado por utilizar un intervalo de 10 segundos ya que el tiempo de ejecución del programa es muy similar en todos los casos y el utilizar un tiempo menor no repercute en un incremento considerable de recursos.

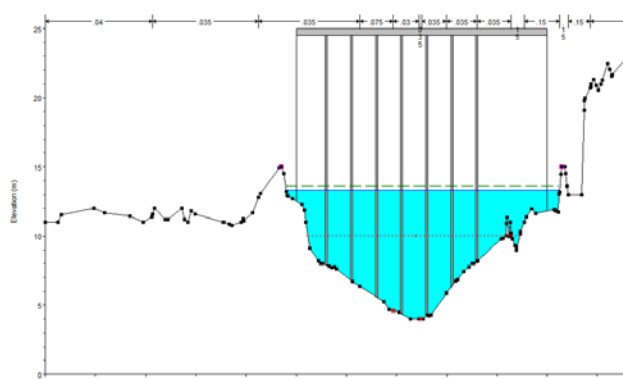
#### 4.2.2. Resultados de la modelización de los puentes

En este apartado se analizarán, una vez construido el puente siguiendo la metodología descrita en apartados anteriores, si la hipótesis del documento de planificación del espacio fluvial de *l'Anoia i el Baix Llobregat* <sup>[14]</sup>, se cumple, es decir se analizan los niveles de agua en las zonas de los puentes.

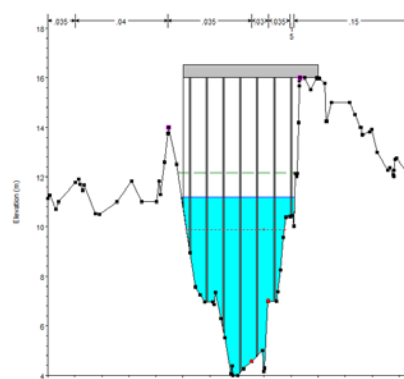
Un dato a destacar es que no es posible desarrollar, en un modelo 1D, el puente del AVE localizado aguas arriba. Esto es debido a que este puente es prácticamente paralelo a la dirección de las secciones. Una de las limitaciones de Hec-Ras 1D es precisamente que no es capaz de modelizar estas situaciones. El resto de puentes sí que se pueden incluir en el modelo 1D. Para realizar la verificación que el tablero del puente del AVE aguas arriba, el que no es posible modelizar en 1D, no se desborda, simplemente se verifica que se encuentra a una cota superior que el calado que se ha obtenido en la modelización 2D. Ésta comprobación ha resultado satisfactoria, por lo que, para este puente, la hipótesis es válida.

Para el resto de puentes, la *Figura 43* muestra los resultados de los niveles de agua que se han obtenido.

*Puente Línea ferrocarril BCN-Manresa:*



*Puente de la carretera C-245:*



*Puente AVE aguas abajo:*

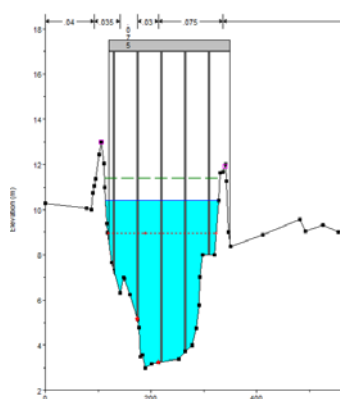


Figura 43. Niveles de agua en los puentes (T=100 años)

Los resultados nos muestran que, efectivamente, el nivel de agua es inferior a la cota donde se sitúa el tablero. Así pues, los tableros no tienen ninguna interferencia con el agua durante la crecida del río. La única interferencia la producen sus pilares.

#### 4.2.3. Mapa de calados y velocidades para la simulación 1D (T=100 años)

Una vez realizadas todas las verificaciones relativas a los puentes y los parámetros han sido debidamente introducidos, se procede a ver los resultados que arroja la simulación 1D. La nueva versión Hec-Ras 5.0 permite la visualización de mapas de calados y velocidades desde Ras Mapper. Por lo tanto, es posible ver los límites de la mancha de inundación que se genera. Lógicamente, los resultados únicamente se han calculado en las secciones y el programa lo que realiza es una interpolación entre dos secciones consecutivas para determinar qué es lo que debe estar pasando entre estas secciones.

Tal y como se puede apreciar, se han obtenido unos resultados para la mancha de inundación muy similares a los que se tiene en la simulación bidimensional. Prácticamente se inundan las mismas áreas y todas aquellas zonas que están protegidas mediante diques de defensa, según el modelo 1D, tampoco se inundarán. Con respecto a la velocidad, las velocidades mayores se producen en la zona del cauce del río y las menores en las zonas más planas de la llanura de inundación.

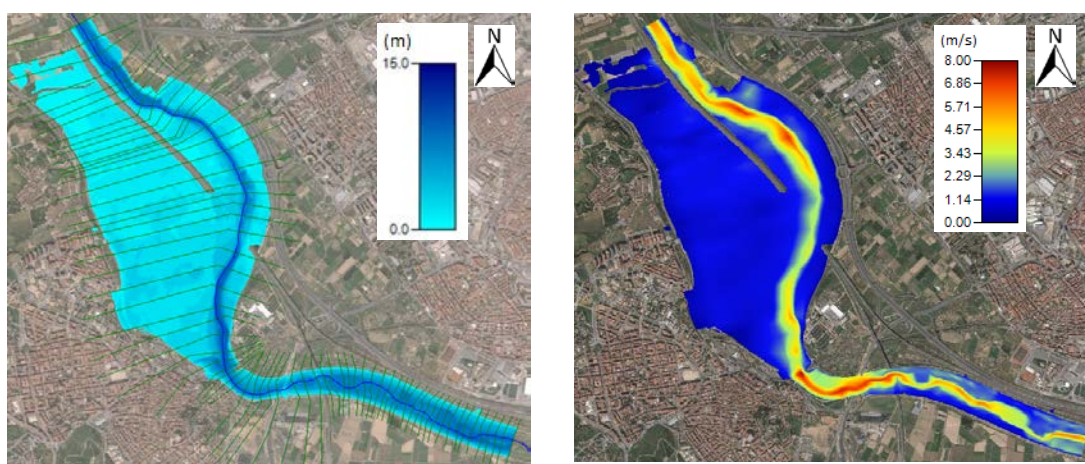


Figura 44. Resultados del calado máximo (izquierda) y la velocidad máxima (derecha) para T=100 años en el modelo 1D

Otro resultado interesante que se puede analizar cuando se realiza un modelo 1D, algo que ya permitían las versiones anteriores, es el perfil del río Llobregat. Como se puede ver en este perfil el agua no supera el nivel de los *Levees* que se han puesto, lo que verifica que el agua no supera los diques de protección. La *Figura 45* muestra el perfil del río con los niveles máximo de agua.

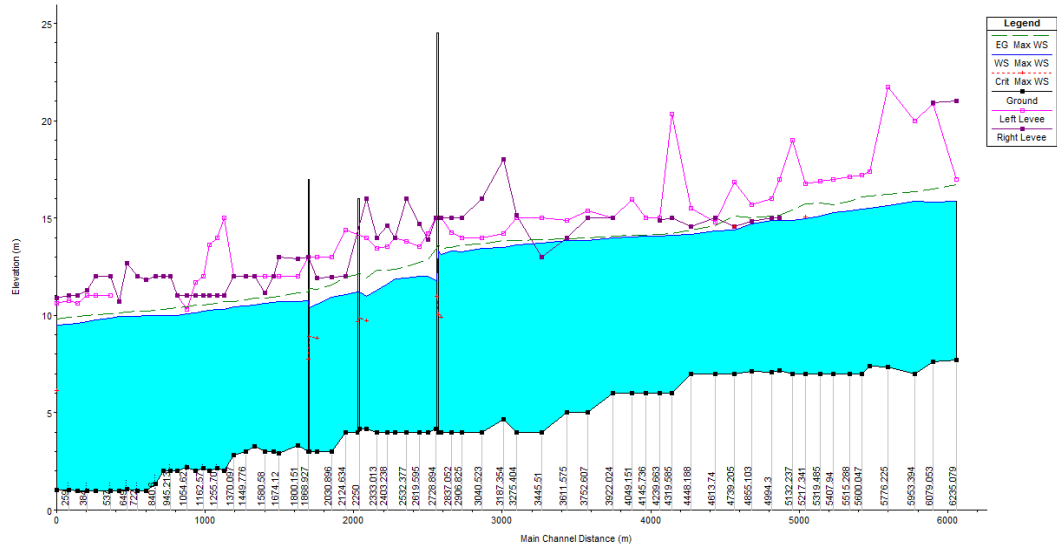


Figura 45. Perfil del río Llobregat para T=100 años

Otro resultado que permite el modelo 1D, es la visualización de cada una de las secciones transversales que se han desarrollado y ver qué nivel de agua tienen en cada instante de tiempo. Como ejemplo, la *Figura 46* muestra el calado máximo para la sección 3752.607. Finalmente, hay que recordar que el análisis se ha realizado en régimen no permanente por lo que se tiene acceso al comportamiento de este perfil y de las secciones en intervalos de 120 segundos.

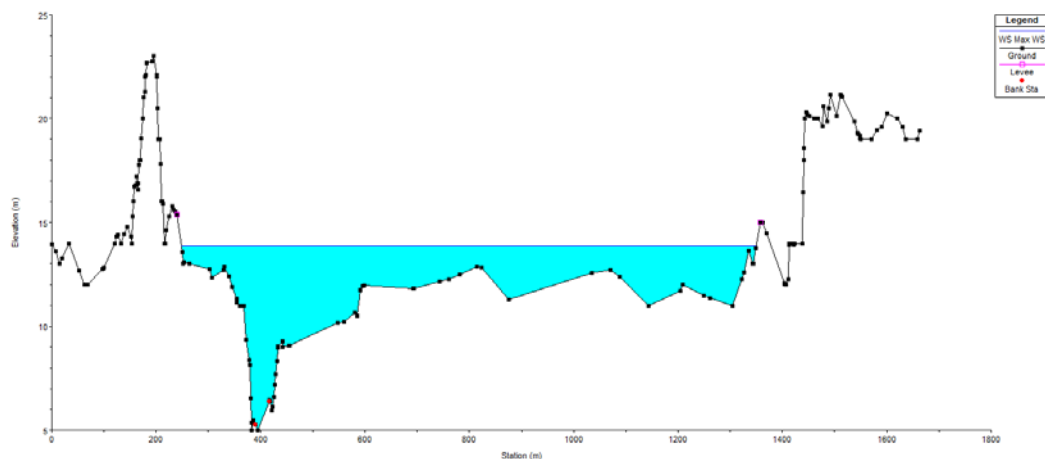


Figura 46. Calado máximo para la sección 3752.607 (T=100 años)

#### 4.2.4. Mapa de calados y velocidades para la simulación 1D (T=10 años)

De igual manera que en apartados anteriores, se realizará la misma simulación para un tiempo de retorno menor. Para un periodo de retorno de T=10 años podemos ver cómo es la mancha de inundación en la *Figura 47*. En este caso la mancha de inundación es mucho menor y no queda tan bien definida cuando se genera el mapa de inundaciones. Para las velocidades sucede algo similar y los resultados quedan



cortados a zonas. Esto es debido a que las interpolaciones que realiza el programa para construir estos planos fallan. Esto puede ser debido a que existen zonas de la planicie de inundación que se encuentran inundadas en una sección, pero en la siguiente sección aguas abajo, en la misma zona no lo están. Esto demuestra el comportamiento menos preciso, de este tipo de modelos, para las zonas más planas, ya que el programa no es capaz de analizar todos los pequeños cambios que se producen en la topografía y puede arrojar resultados confusos.

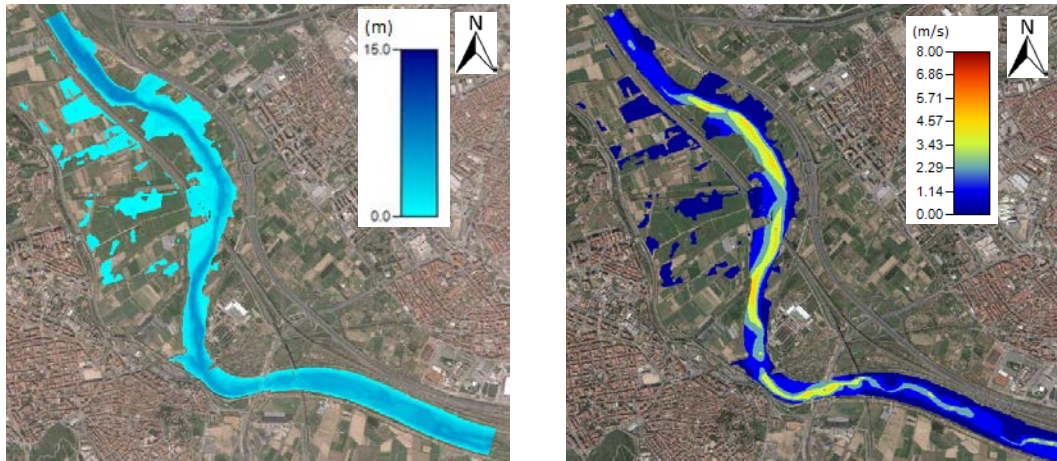


Figura 47. Resultados del calado máximo (izquierda) y la velocidad máxima (derecha) para T=10 años en el modelo 1D

Además, como en el apartado anterior, se puede ver el perfil del río Llobregat. Como se puede comprobar en este caso el nivel de agua que se alcanza es mucho menor. También se puede ver que en este caso tampoco se superan los Levees que se han introducido en el modelo, por lo tanto, el agua no superará los diques e infraestructuras y no inundará las zonas protegidas con estas infraestructuras. La Figura 48 muestra el perfil con el nivel máximo de agua para T=10 años.

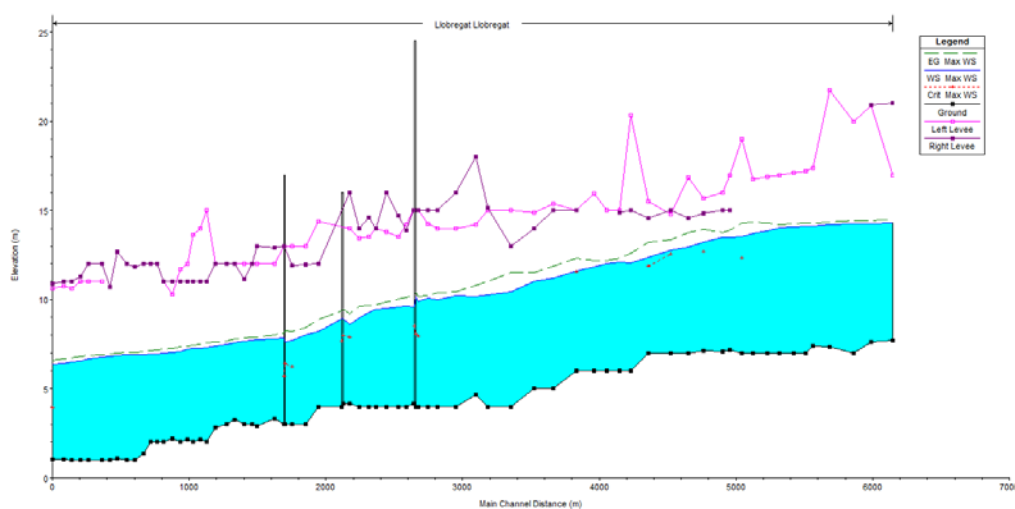


Figura 48. Perfil del río Llobregat (T=10 años)



Finalmente, se mostrará el resultado del nivel de agua para la misma sección que se visto anteriormente. La *Figura 49* muestra la sección transversal 3752.607 y su nivel de agua máximo para un periodo de retorno de  $T=10$  años.

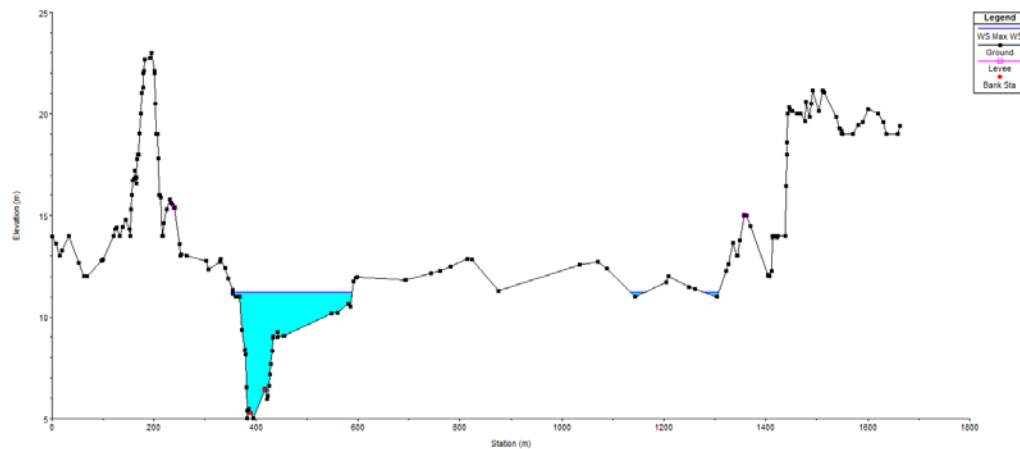


Figura 49. Calado máximo para la sección 3752.607 ( $T=10$  años)

#### 4.2.5. Problemas encontrados durante el desarrollo del modelo 1D

El mayor problema y desafío que se ha presentado la realización del modelo 1D, ha sido ajustar correctamente las secciones transversales y obtener unas secciones cuya forma sea correcta y realista. Para ello, ha sido necesario un largo y laborioso trabajo de ajuste de secciones y de introducción de los *Levees*, ya que existen infinidad de obstáculos en el terreno y sin este tipo de condiciones el resultado no se ajustaría a la realidad. También hay que destacar que la correcta elaboración de los puentes resulta compleja, ya que aportan más inestabilidad y complejidad al modelo.

#### 4.3. Modelización cuasi 2D (1D/2D)

En tercer lugar, se desarrollará una simulación utilizando la técnica de combinar las dos metodologías mostradas anteriormente. Este tipo de simulación es una novedad en Hec-Ras y uno de los puntos fuertes de esta nueva versión. Permite la combinación de un modelo con zonas donde se calculará el flujo de manera unidimensional y otras zonas donde se creará una malla para calcular el flujo bidimensionalmente.

En este trabajo, el modelo se desarrollará utilizando un modelo 1D en la zona del cauce del río Llobregat, que es la parte donde el flujo de agua se asemeja más a un modelo unidimensional, y un modelo 2D en la zona de la planicie de inundación, donde el agua adquiere un carácter mucho más bidimensional. Con este tipo de metodología se espera obtener las ventajas de la modelización 1D, como por ejemplo, que el tiempo de ejecución del programa sea menor que respecto al modelo completamente en 2D, y la mayor precisión en los resultados que aporta modelo 2D en las zonas más planas.

### 4.3.1. Desarrollo del modelo

#### 1. Paso 1: Pre proceso mediante ArcGis.

Para realizar este tipo de simulación se utilizarán los archivos que se han utilizado para la simulación 2D, en concreto aquellos ficheros en formato flotante que contienen la información relativa al terreno. También se utilizarán los archivos que se han importado en el modelo 1D relativos al río y a sus secciones transversales. Un punto a destacar, es que este modelo necesita conectar la zona 1D con la zona 2D. Para realizar esta conexión Hec-Ras propone distintas opciones. Para este tipo de escenarios la mejor opción es la creación de una estructura lateral a lo largo de la zona de conexión. Para la crear dicho elemento, lo más sencillo es construirlo con ArcGis y posteriormente exportarlo a Hec-Ras.

#### 2. Paso 2: Importación de la información de ArcGis y generación de la geometría.

En este apartado se procederá de igual manera que en los apartados anteriores, se importará la información que se ha generado en ArcGis en los formatos adecuados para abrirlas en Hec-Ras. Los archivos necesarios para esta simulación son el archivo flotante del terreno, el archivo que se ha utilizado en la simulación 1D que contiene información de las secciones y el nuevo archivo que contiene la estructura lateral. Finalmente, se creará la malla en la zona que queremos obtener resultados bidimensionales, que para este trabajo es la zona de la planicie de inundación. Como último paso, es necesario conectar, mediante la estructura lateral, la zona 2D con el cauce del río. El tamaño de malla que se ha utilizado para este tipo de simulación es el mismo que el utilizado en el modelo completamente en 2D, es decir, una malla con un tamaño de celda de 10x10 metros.

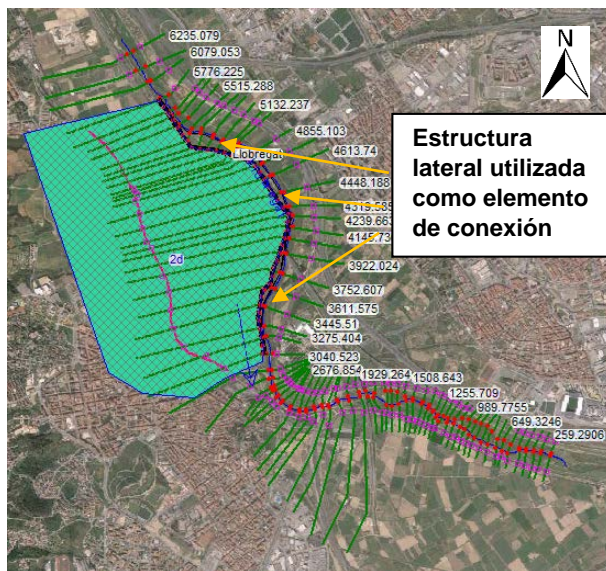


Figura 50. Pre proceso con ArcGis con la extensión Hec-GeoRas

#### 3. Paso 3: Condiciones de contorno.

Como en los apartados anteriores, se ha decidido realizar una simulación en régimen no permanente para obtener unos resultados más completos e interactivos.

Con respecto a las condiciones de contorno. Se han aplicado aquellas mencionadas en los anteriores apartados, es decir, en la sección de aguas arriba se ha introducido un hidrograma de flujo del río Llobregat y en la última sección aguas abajo se ha aplicado la condición de calado normal. Como condición de contorno adicional se introducido que la estructura lateral está conectada al cauce del río en 1D y a la zona 2D.

#### 4. Paso 4: Simulación.

Finalmente, una vez ya se ha creado la geometría y se han introducido las condiciones de contorno en el programa, procedemos a determinar qué parámetros se han de introducir en la ventana de simulaciones de régimen no permanente para conseguir un modelo completamente estable.

Como comentario, mencionar que este modelo ha resultado muy complejo ya que al principio siempre era inestable. Se ha tenido que ajustar con mucho cuidado todos los elementos hasta que los resultados fueran coherentes. El elemento que genera mayor inestabilidad es el elemento de conexión, ya que la altura de la estructura lateral no siempre cuadra con la altura interpolada de la celda donde se encontraba situada. Es decir, al producirse la interpolación y asignar una elevación a la celda, ésta a veces queda situada por debajo de la altura que tiene la estructura lateral. Así pues, para solucionar este problema se han tenido que ajustar todos los puntos hasta conseguir que el modelo fuese estable.

Con respecto al tamaño de la celda utilizado, se ha decido utilizar como en el modelo 2D una celda de 10x10 para realizar los cálculos y estar en consonancia con el modelo bidimensional. Para el tiempo de intervalo de simulación del programa, se han realizado las siguientes simulaciones para encontrar que tiempo proporciona mejores resultados.

| <b>Intervalo del tiempo de simulación</b> | <b>Duración de la ejecución del programa (horas:minutos:segundos)</b> | <b>Estabilidad</b>              |
|---|---|---------------------------------|
| 60 segundos                               | -   | Error al ejecutar la simulación |
| 30 segundos                               | -   | Error al ejecutar la simulación |
| 10 segundos                               | 1:38:48   | Inestable                       |
| 5 segundos                                | 3:45:36   | Inestable                       |
| 1 segundos                                | 4:14:09   | Estable                         |

Tabla 8. Parámetros del intervalo de simulación para 1D

Lo primero que se puede comprobar es que para intervalos de 60 y 30 segundos el modelo da error al ejecutarse y no permite obtener ningún tipo de resultados. Por lo tanto, es necesario reducir el tiempo de simulación mucho más. A continuación, se analizan los resultados de los calados de agua en el punto 1 para los intervalos de

tiempo que si permiten ejecutarse en el programa. La *Figura 51*, muestra la relación entre el calado y el tiempo para diferentes modelos.

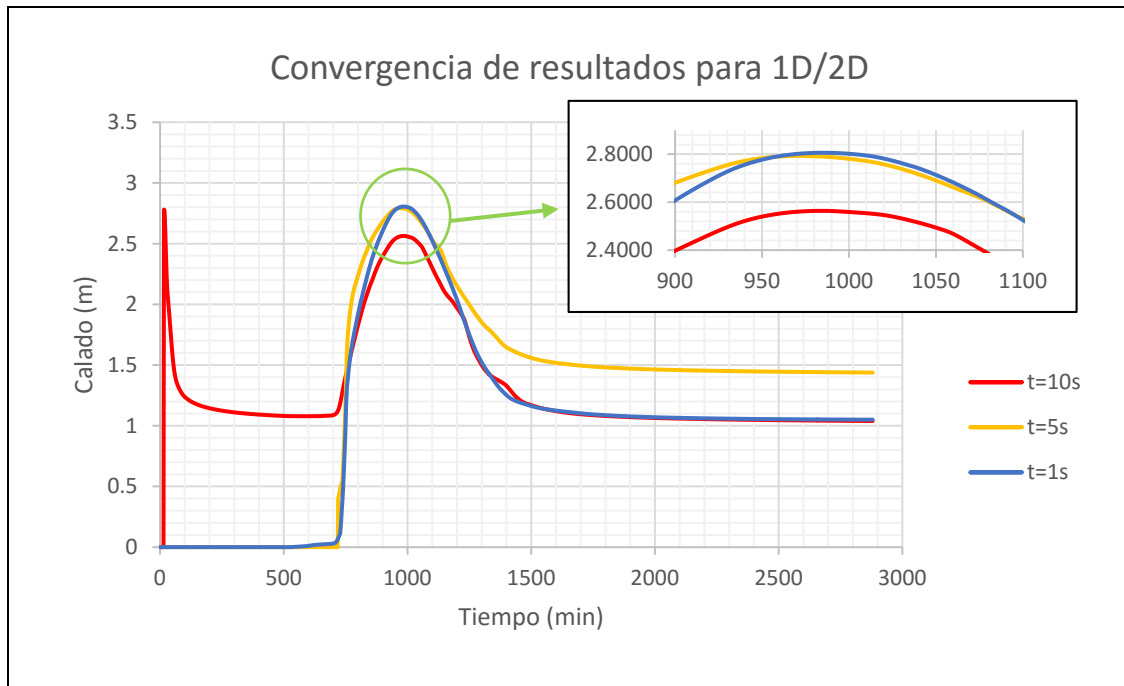


Figura 51. Nivel de agua en un punto para los diferentes intervalos de simulación

En dicha grafica se puede comprobar que para 1 y 5 segundos los resultados son muy similares. Sin embargo, para un tiempo de 10 segundos, el resultado presenta una inestabilidad en los primeros segundos y aporta unos resultados de calado máximo menor que los otros dos. Así pues, observando estos resultados se concluye que los resultados para 5 y 1 segundos funcionan satisfactoriamente. Se ha decidido utilizar el intervalo de tiempo de 1 segundo, ya que a pesar que el tiempo de ejecución del programa es un poco mayor, la curva esta mejor definida y parece que los resultados podrían ser un poco mejores. No obstante, como se ha dicho, ambos parámetros arrojaran resultados precisos y satisfactorios.

#### 4.3.2. Mapa de calados y velocidades para 1D/2D (T=100 años)

A continuación, se muestra el mapa de calados que se ha obtenido para este tipo de simulación. En este plano, se puede ver que se genera una mancha de inundación muy similar a las dos anteriores y especialmente similar la 2D. Esto es lógico, ya que las zonas más complejas y donde se requiere de mayor precisión han sido calculadas mediante la malla 2D. Finalmente destacar, que, aunque durante la construcción del modelo el usuario desarrolla y diferencia las dos partes, la 1D y la 2D, el programa proporciona unos resultados donde combina perfectamente e integra ambas modelizaciones y los resultados no tienen ningún tipo de discontinuidad en la zona de frontera o conexión.

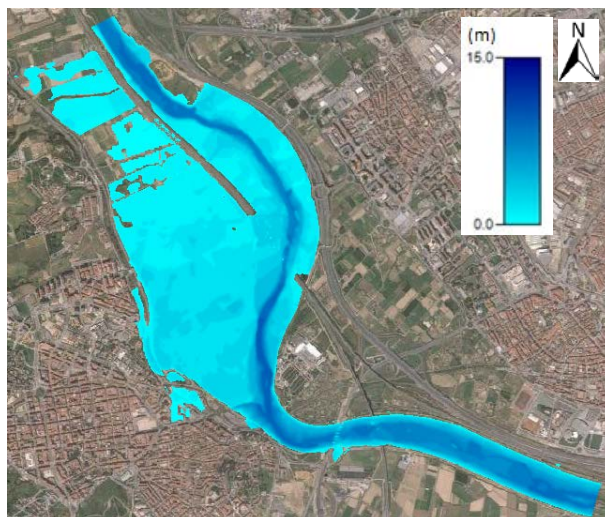


Figura 52. Nivel máximo de agua para 1D/2D para T=100 años

Con respecto a los resultados de las velocidades, el plano que se genera también tiene una forma lógica, aportando unos resultados de una velocidad mayor en las zonas del cauce del río, donde el lecho es más profundo. En la zona de la planicie de inundación los resultados son menores, ya que esta zona es mucho más plana y los niveles de agua menores.

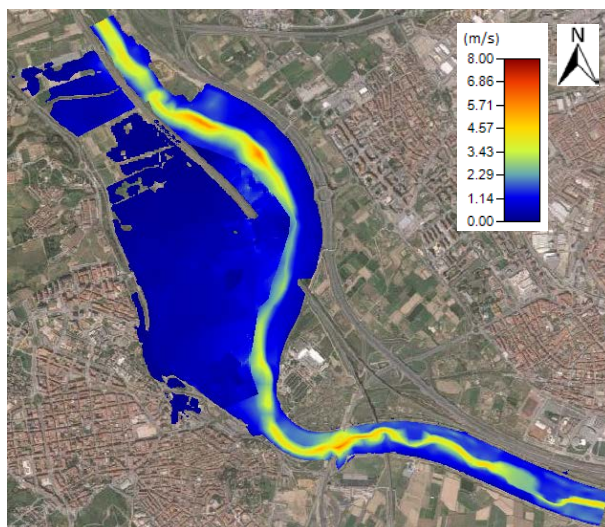


Figura 53. Velocidades del agua para 1D/2D para T=100 años

#### 4.3.3. Mapa de calados y velocidades 1D/2D (T=10 años)

Finalmente, se procederá a la elaboración de un plano de inundación para un periodo de retorno menor para analizar cómo se comportará ante este escenario este tipo de modelización. Con respecto al mapa de calados, se puede ver que no se presentan las discontinuidades que se producían en el modelo 1D en la zona de la planicie y que el algoritmo de combinación también resuelve satisfactoriamente la zona de la planicie de inundación con volúmenes menores de agua. Se puede ver que este plano se asemeja



mucho al plano de inundación del modelo 2D y proporciona unos contornos de inundación similares.

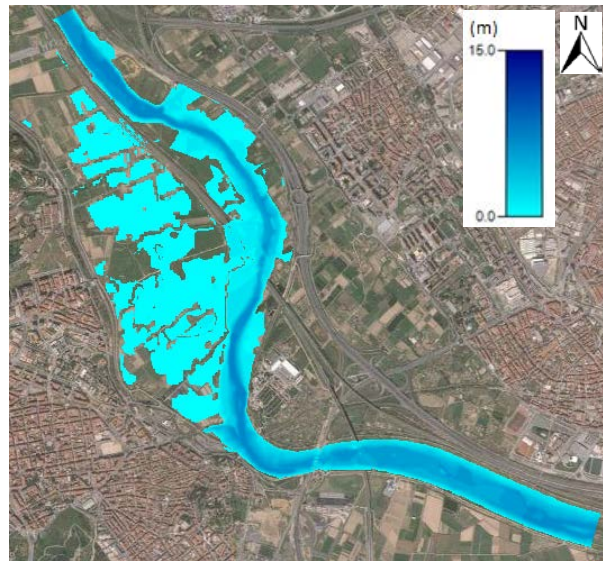


Figura 54. Nivel máximo de agua para 1D/2D para T=10 años

Con respecto a la velocidad, podemos comprobar que se cumplen también los patrones de los modelos anteriores, con una velocidad mucho mayor en el cauce y una baja velocidad en la zona de la planicie de inundación. Además, también se soluciona el problema de discontinuidad que se generaba en el modelo 1D. Así pues, la zona relativa a la planicie de inundación queda mejor definida mediante una malla 2D.

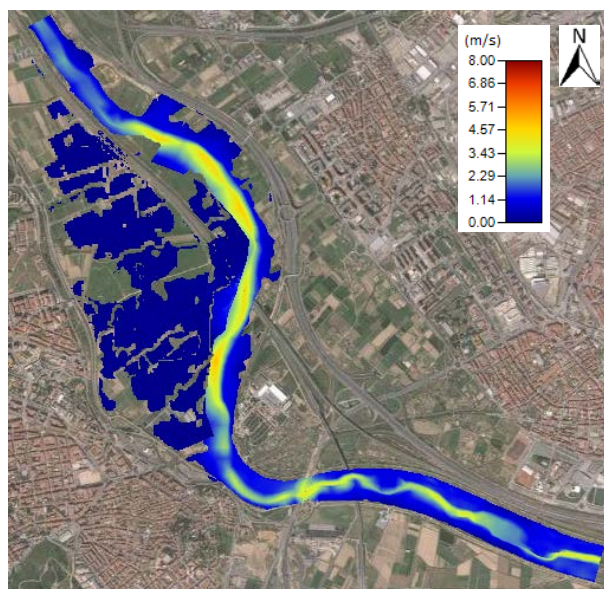


Figura 55. Velocidades del agua para 1D/2D para T=10 años

#### **4.3.4. Problemas encontrados durante el desarrollo del modelo 1D/2D**

Este modelo ha sido el más complejo de desarrollar y de conseguir unos resultados coherentes. El mayor problema se ha detectado en la zona de conexión entre las dos tipologías de cálculo, lo que ha llevado a necesitar un laborioso trabajo para conseguir que esta zona fuese estable.

Además, hay que destacar que la estructura lateral podría influir en los resultados que se obtengan. Ya que Hec-Ras obliga a que este elemento tenga una cota mayor que la del terreno por lo tanto se está imponiendo una barrera ficticia, que el agua habrá de superar para desplazarse de la zona 1D y alcanzar la zona 2D. Es cierto que el error relativo a este hecho genera errores muy pequeños, pero es algo que hay que tener en cuenta si se realiza un estudio y análisis con una elevada precisión.

Finalmente, existe otro problema asociado al elemento de conexión. La estructura lateral se ha importado desde ArcGis y presenta una precisión de pocos metros en algunas zonas. Sin embargo, la malla utilizada presenta una precisión de 10x10 metros. Esto puede generar que en algún punto la elevación que el programa asigna a una celda, no cuadre con la elevación de la estructura lateral en ese punto y sea menor. Esta situación da error en Hec-Ras, ya que la estructura lateral ha de tener una mayor cota que la celda, y por lo tanto habrá que solucionar este problema modificando el valor de la estructura lateral, lo que puede provocar algún error de imprecisión.

## 5. Análisis de los resultados entre las diversas tipologías de modelización (1D vs 2D vs 1D/2D)

A continuación, se analizarán y compararán los diversos resultados que se han obtenido entre los diferentes modelos. Se realizarán dos tipos de análisis. La primera comparativa desarrollada, consiste en analizar y comparar los diferentes resultados mediante un mapa de peligrosidad. Gracias a estos mapas, se verá si todas las metodologías establecen las mismas zonas peligrosas o si por el contrario algún modelo es menos preciso y menos conservador. En segundo lugar, se elegirán 4 puntos pertenecientes a la zona de análisis donde se compararán los calados máximos y en qué instante temporal se producen. Con estos análisis se comprenderá cual es el mejor modelo para cada zona. Finalmente, se analizan una serie de zonas urbanas sobre las cuales los modelos han indicado que se inundan; se analizará si estos resultados son lógicos.

### 5.1. Mapas de peligrosidad

La primera metodología que se ha desarrollado para poder comparar rápidamente los resultados, consiste en analizar la inundación en función de su peligrosidad. Para ello, se ha generado un mapa donde se puede ver claramente qué zonas son peligrosas. Para determinar qué parámetros indican que una zona es peligrosa, se ha estudiado en función de lo que establece el Real Decreto 9/2008, del 11 de enero y que está recogido en el Boletín Oficial del Estado (BOE) <sup>[19]</sup>. Esta normativa establece que se considerará que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

- a) Que el calado sea superior a 1 m.
- b) Que la velocidad sea superior a 1 m/s.
- c) Que el producto de ambas variables sea superior a  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Por lo tanto, en función de estos valores se establecerá qué zona es peligrosa. Una de las limitaciones que se ha encontrado en esta versión de Hec-Ras 5.0, y que acorde a la información de la institución que desarrolla este programa en la próxima actualización se solucionará, es que no funciona correctamente la opción de exportación de los resultados a ArcGis. Esto supone una limitación para analizar la peligrosidad acorde a la condición “c”, ya que esta opción requiere calcular el producto de la velocidad por el calado. Esto no se puede realizar en Hec-Ras y sería necesario realizarlo en ArcGis. Así pues, se analizará la peligrosidad en función de las condiciones a y b.

La *Figura 56* muestra los diferentes planos de calados que se han obtenido para cada simulación y para cada periodo de retorno. Estos planos se han discretizados por intervalos de colores, según el valor del calado. El color verde indica que el calado está por debajo de 1 metro y que por lo tanto la zona no es peligrosa. La *Figura 57* muestra el respectivo plano de velocidades, también discretizado con los mismos valores, pero el valor verde representa que las velocidades en esa zona son menores a 1m/s.



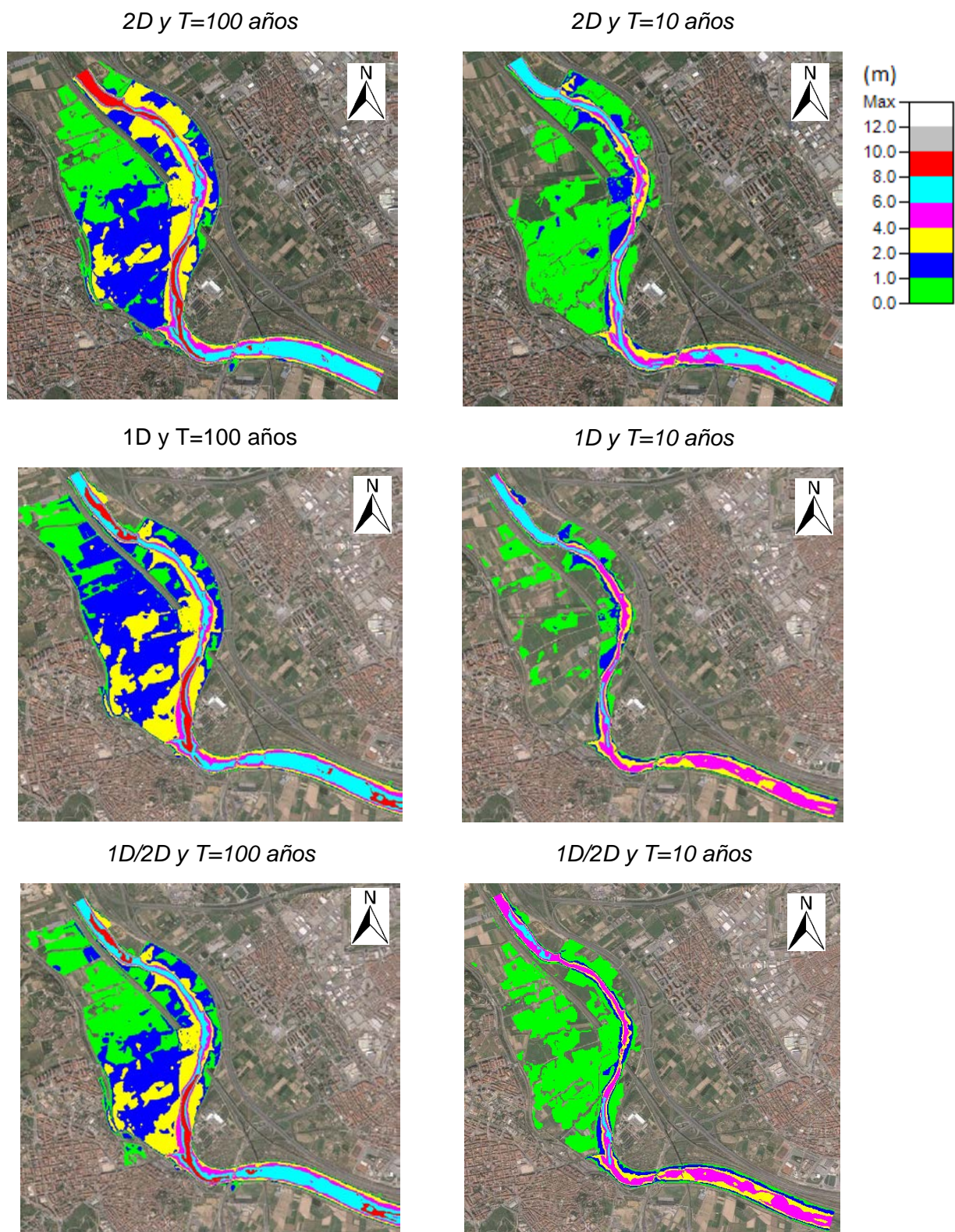


Figura 56. Mapas de calados discretizados



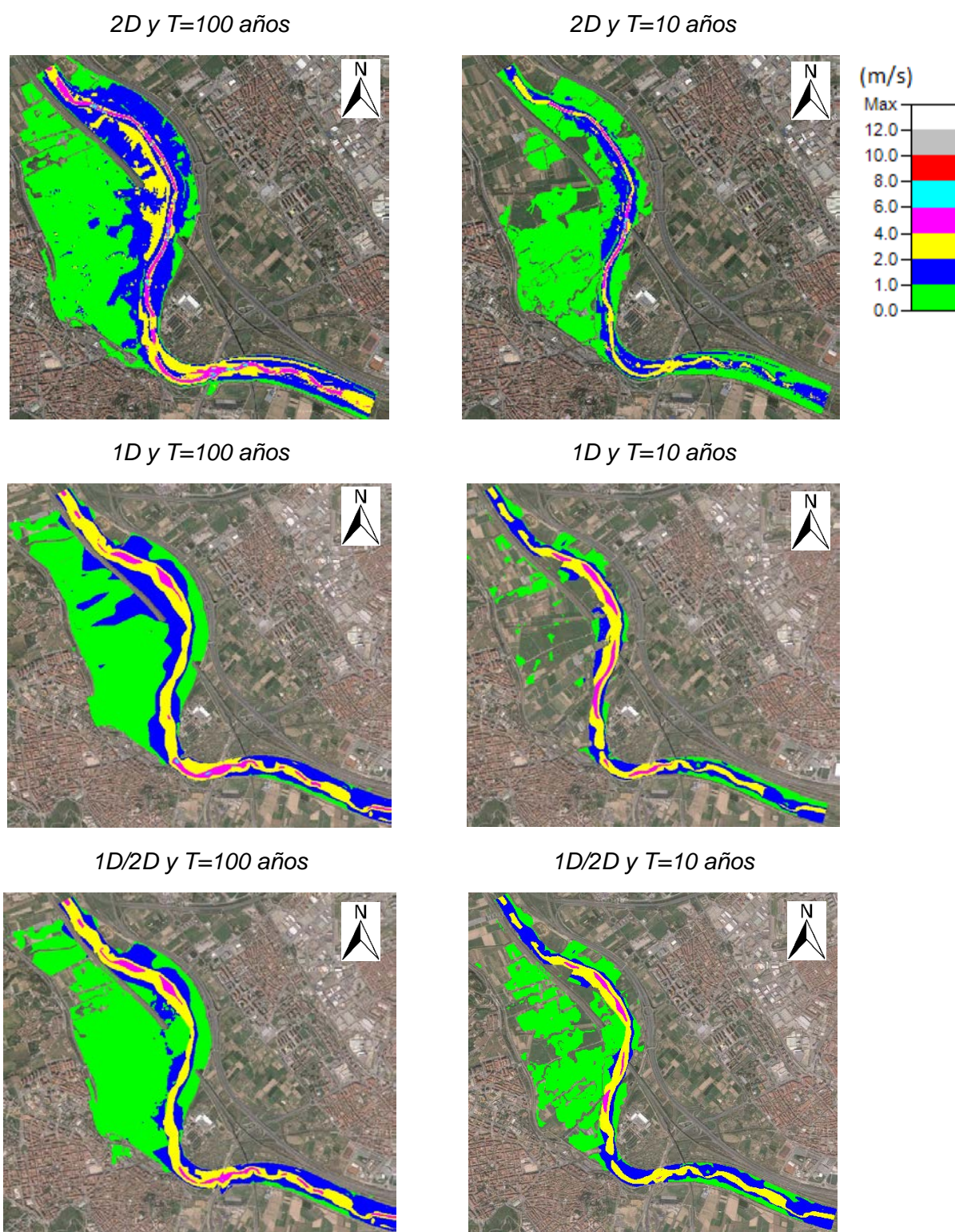


Figura 57. Mapas de velocidades discretizados

### 5.1.1. Análisis de los mapas de calados discretizados

Acorde a la condición “a”, las zonas donde se producen calados mayores a 1 metro son zonas peligrosas. La *Figura 56* muestra los calados máximos de agua discretizados en intervalos, con un color diferente para cada intervalo. Acorde a lo descrito, se puede comprobar que todas aquellas áreas que no son de color verde (el verde representa los calados comprendidos entre 0 y 1 metro) tienen una elevada peligrosidad.

Por lo que respecta al tiempo de retorno de  $T=100$  años, los tres modelos tienen en común que los calados son mayores en las zonas relativas al cauce principal del río y que estos calados decrecen a medida que nos alejamos de estas zonas y nos acercamos a la planicie de inundación. La zona de la planicie de inundación situada al oeste, en el margen derecho del río, según los tres modelos, es el área donde podemos encontrar mayores áreas sin peligro, es decir zonas representadas utilizando el color verde. Además, la *Figura 56* muestra que los resultados de peligrosidad son mucho más semejantes entre el modelo 2D y el modelo 1D/2D. Esto parece lógico ya que ambos han analizado la planicie de inundación acorde a un modelo 2D y es el lugar donde existen más zonas con bajo peligros. En la parte Noroeste (en el margen derecho) los calados son mayores para el modelo 1D. Este hecho puede ser debido a la influencia del talud del AVE situado en esa zona. Este talud representa una barrera para el agua y únicamente gracias a la existencia de los drenajes transversales se permite el paso hacia el otro lado. Esta zona compleja que interconecta los dos lados del talud mediante obras de drenaje lateral, no se puede modelar perfectamente en un modelo 1D, por lo que los resultados obtenidos para esta zona pueden estar sobredimensionados y aportar unos valores mayores. Así pues, para esta zona los resultados obtenidos mediante el modelo 2D son más precisos.

Con los puntos expuestos, se puede concluir que las zonas de peligrosidad para los 3 modelos arrojan resultados muy similares para las zonas cercanas al cauce del río y resultados más diferentes a medida que nos introducimos en la planicie de inundación y en las zonas más alejadas del cauce del río, acentuándose las diferencias entre el modelo 1D y los modelos 2D y 1D/2D.

Por otro lado, para un periodo de retorno de  $T=10$  años, los resultados son más diferentes entre los diferentes modelos. Bajo estas condiciones, la zona de la planicie de inundación no presenta tanto peligro, ya que los calados son en prácticamente en todos los puntos menores a 1 metro. De igual manera que para  $T=100$  años, los resultados relativos a la zona del cauce del río son similares y difieren más a medida que nos alejamos. El modelo 1D aporta unos resultados muy diferentes y que no parecen coherentes. Estos resultados poco precisos para el modelo 1D, pueden ser debidos al hecho que ahora circula una cantidad menor de agua por la zona. Esta agua se irá desplazando e irá inundando las zonas y los caminos que se encuentran a una cota inferior. Este proceso de inundación es completamente bidimensional y el modelo 1D no lo simula adecuadamente. Además, los cálculos se realizan para cada sección y el resto de puntos son interpolados para generar el mapa de inundación de toda la zona. Así pues, la precisión es mucho menor.

Teniendo todos estos resultados presentes, para un periodo de retorno menor, los resultados son todavía más diferentes entre los modelos 1D y 2D, especialmente para la zona de la planicie de inundación donde los resultados son mucho más imprecisos ya que el modelo 1d no tiene en cuenta toda la topografía de la planicie, únicamente la topografía donde están ubicadas las secciones transversales.

### **5.1.2. Análisis de los mapas de velocidades discretizados**

Con respecto a las velocidades, de igual manera que en el modelo anterior, se puede apreciar que las zonas de calor verde son aquellas zonas que tienen un valor de velocidad menor a 1m/s y que por lo tanto no presentan peligro.

Para un periodo de retorno de  $T=100$  años, todos los modelos de velocidades determinan que en la zona de la planicie de inundación las velocidades son muy bajas y que en la mayor parte de esta zona el peligro no es elevado. Los resultados entre los modelos 2D y 1D/2D difieren en el margen derecho del río, en concreto, en toda la frontera entre el cauce principal del río y la llanura de inundación. En esta zona para el modelo 1D/2D es donde está ubicada la estructura lateral que se ha utilizado como conexión entre los dos tipos de modelización. Por lo tanto, en la zona de frontera se puede comprobar que este elemento está generando algo de imprecisión ya que hace variar los resultados con respecto al modelo 2D, al cual debería parecerse mucho más. Así pues, en esta zona los resultados más precisos para la velocidad, los arroja el modelo completamente desarrollado en 2D.

Se puede concluir que para  $T=100$  años el elemento más restrictivo con respecto a la peligrosidad, es el calado ya que, en las zonas de la llanura de inundación las velocidades no son muy elevadas pero los calados si pueden serlo y generar peligro.

Para un periodo de retorno de  $T=10$  años, los modelos 2D y 1D/2D aportan unos resultados bastante parecidos. Los resultados de velocidad que se obtienen para la simulación 1D vuelven a ser muy poco coherentes ya que existen resultados a trozos. Tal y como se ha mencionado anteriormente los resultados para las velocidades son más precisos para los modelos 2D que para los modelos 1D. Esto vuelve a ser debido a que la generación de los resultados en la planicie de inundación no es muy precisa ya que la topografía de la zona es muy compleja y el modelo 1D no modeliza con precisión este escenario.

Finalmente, se concluye que las velocidades son muy bajas para  $T=10$  años y que el elemento más restrictivo vuelve a ser el calado como en el caso de  $T=100$  años.

## **5.2. Comparación de los niveles de agua entre las diversas tipologías de modelización (2D vs 1D vs 1D/2D) para diversos puntos**

El segundo análisis que se ha realizado, ha consistido en seleccionar una serie de puntos que permitan comprender como se comporta el agua en cada modelo. La *Figura 58* recoge qué puntos se han seleccionado. Algunos pertenecen al cauce del río



y otros a la planicie de inundación. Así pues, con la elección de diferentes tipos de puntos, se intentará comprender el funcionamiento de cada modelo en cada punto.



Figura 58. Plano de ubicación de los puntos de análisis

### 5.2.1. Punto 1- Sección 3611.575

Este punto está localizado en la planicie de inundación en el margen derecho del río Llobregat. En esta zona hay campos de cultivos por lo que se podrían alcanzar niveles de agua elevados sin que representen un peligro para las personas o las infraestructuras. A continuación, se analiza qué calados máximos se alcanzarán y en qué momento sucede el pico de agua.

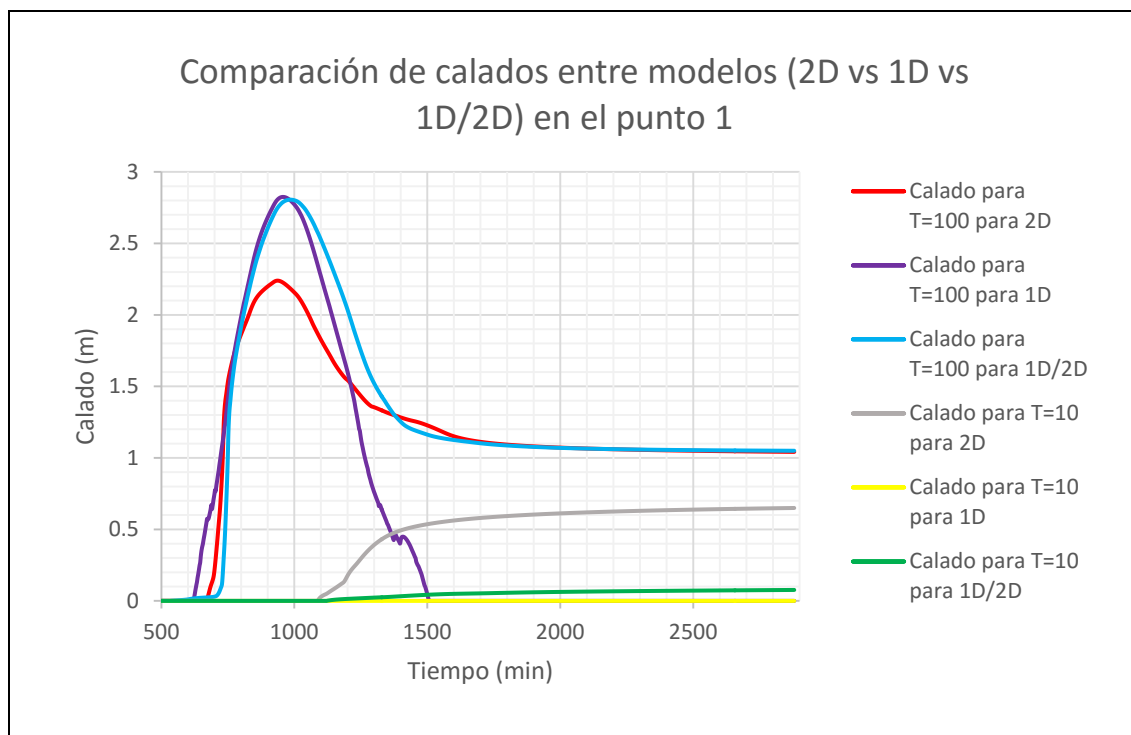


Figura 59. Calados en el punto 1 para los 6 modelos

| Tipo de modelización | Tiempo de retorno (años) | Calado máximo (m) | Incremento de tiempo, después del inicio de la simulación, en el que se produce el máximo |
|----------------------|--------------------------|-------------------|---|
| 2D                   | 100                      | 2.24              | 936 min / 15 horas y 36 minutos   |
| 1D                   | 100                      | 2.82              | 956 min / 15 horas y 56 minutos   |
| 1D/2D                | 100                      | 2.81              | 984 min / 16 horas y 24 minutos   |
| 2D                   | 10                       | 0.65              | 2878 min / 47 horas y 58 minutos  |
| 1D                   | 10                       | 0.00              | -   |
| 1D/2D                | 10                       | 0.08              | 2878 min / 47 horas y 58 minutos  |

Tabla 9. Calados máximos en el punto 1

Tal y como se puede ver en la *Tabla 9*, para un periodo de retorno de  $T=100$  años el nivel máximo de agua es 2.82 metros y se produce 15 horas y 56 minutos después del inicio de la simulación. Para  $T=100$  años, los resultados del modelo 2D son muy diferentes a los del resto de modelos. Existe una reducción aproximada del nivel máximo de agua del 21% con respecto al modelo 1D. Esta variación de los niveles máximos, se puede deber a lo que ya se expuesto anteriormente, es decir, la gran complejidad de la zona de la planicie de inundación, la cual está repleta de obstáculos, y que el modelo 2D simula con una gran precisión, ya que se adapta mejor a la topografía del terreno, pero que en cambio el modelo 1D no es capaz de simular correctamente. Así pues, se puede concluir que los resultados del modelo 1D están posiblemente sobredimensionados y arrojan resultados mayores. Con respecto al modelo 1D/2D desataca que no tiene el comportamiento esperado, ya que se esperaba que tuviese un comportamiento más similar al del modelo 2D. Sin embargo, el nivel máximo es mucho más similar al del modelo 1D.

Con respecto al periodo de retorno de 10 años, el nivel máximo de agua que se alcanza en este punto es de 0.65 metros, según al modelo 2D. Acorde al resto de modelos el nivel de agua es prácticamente cero, por lo que estas zonas no se inundan.

Finalmente, destacar que el modelo 1D también nos permite la visualización del nivel de agua en la sección donde está ubicado este punto. La *Figura 60* muestra la forma de la sección donde está ubicado el punto de análisis y sus respectivos niveles de agua. Tal y como se puede apreciar estas secciones son muy complejas y poseen muchos obstáculos en la zona de la planicie inundación (Zona de la derecha) por lo que el modelo 1D no tiene un comportamiento muy preciso en esta zona.

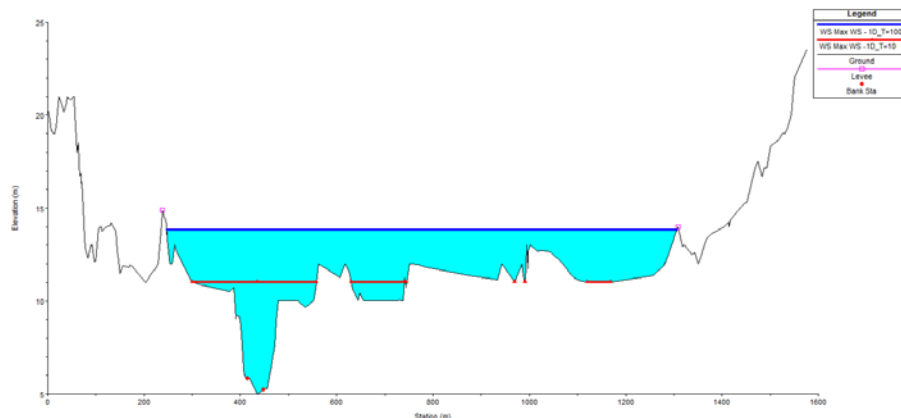


Figura 60. Niveles de agua para la sección 3611.575

### 5.2.2. Punto 2- Sección 3275.404

Este punto también está ubicado en la zona de la planicie de inundación, pero más al sur que el punto anterior. El objetivo de analizar otro punto con unas características similares es tratar de establecer si existe algún patrón de comportamiento para cada uno de los modelos en función de la zona donde se encuentra ubicado. El Punto 2, es un punto elevado localmente, es decir, está rodeado de zonas más bajas. Por lo tanto, tal y como se puede comprobar los niveles máximos de agua para  $T=100$  años son de 1.62 metros, pero cuando el volumen de agua que circula es mucho menos, como por ejemplo para un periodo de retorno de  $T=10$  años, esta zona prácticamente no se inunda ya que el agua no alcanza este punto porque la cota del terreno está más elevada que las zonas colindantes.



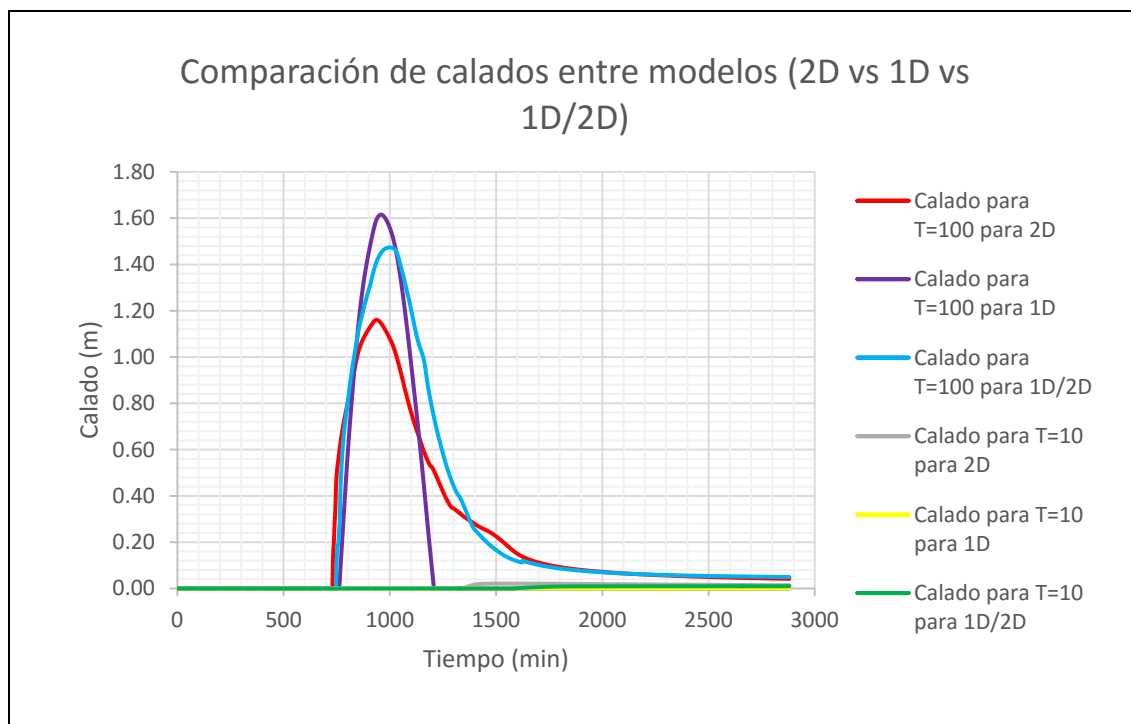


Figura 61. Calados en el punto 2 para los 6 modelos

| Tipo de modelización | Tiempo de retorno (años) | Calado máximo (m) | Incremento de tiempo, después del inicio de la simulación ,en el que se produce el máximo |
|----------------------|--------------------------|-------------------|---|
| 2D                   | 100                      | 1.16              | 936 min / 15 horas y 36 minutos   |
| 1D                   | 100                      | 1.62              | 958 min / 15 horas y 58 minutos   |
| 1D/2D                | 100                      | 1.47              | 984 min / 16 horas y 24 minutos   |
| 2D                   | 10                       | 0.02              | 2878 min / 47 horas y 58 minutos  |
| 1D                   | 10                       | 0.00              | -   |
| 1D/2D                | 10                       | 0.01              | 2878 min / 47 horas y 58 minutos  |

Tabla 10. Calados máximos en el punto 2

Para T=100 años, el comportamiento temporal de los niveles de agua es muy similar al del punto 1. El valor máximo del agua lo proporciona el modelo 1D, el modelo 2D registra un valor menor con una reducción de aproximadamente de un 19%. Al igual que en el apartado anterior, el modelo 1D/2D proporciona un resultado mayor que el modelo 2D, pero mejor que el obtenido en el 1D. Para el tiempo de retorno de T=10 años, en todos los modelos, se puede comprobar que este punto prácticamente no se inundada. Así pues, para estos dos puntos analizados que se encuentran en la zona de la planicie de inundación los calados más elevados los proporciona el modelo 1D con una reducción del al 19% en el modelo 2D con respecto a los calados máximos.

Al igual que en el apartado anterior, se puede visualizar, para el modelo 1D, la sección transversal y sus respectivos niveles de agua para la sección que contiene el punto 2.

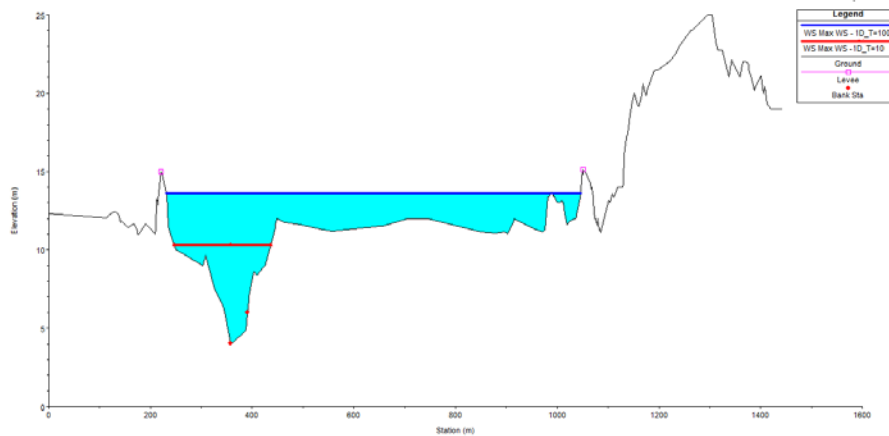


Figura 62. Niveles de agua en la sección 3275.404

### 5.2.3. Punto 3- Sección 3752.607

Este punto está ubicado en una zona muy cercana al cauce principal del río Llobregat. Este punto tiene la particularidad que se encuentra situado muy cerca de la estructura lateral que se ha creado para simular la conexión entre la zona 1D y 2D en el modelo cuasi 2D (1D/2D), por lo tanto, es un punto interesante para analizar y comprender qué es lo que pasa en esta zona y si los resultados que se obtienen están influenciados por esta condición en el caso 1D/2D.

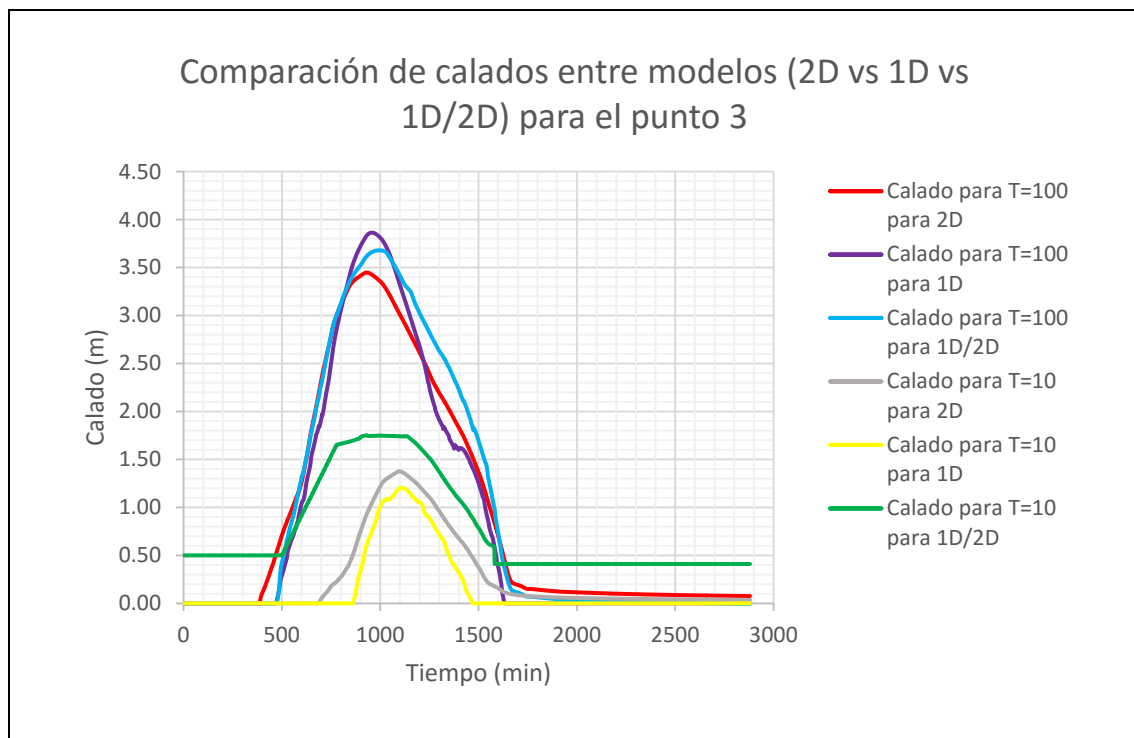


Figura 63. Calados en el punto 3 para los 6 modelos

| <b>Tipo de modelización</b> | <b>Tiempo de retorno (años)</b> | <b>Calado máximo (m)</b> | <b>Incremento de tiempo, después del inicio de la simulación ,en el que se produce el máximo</b> |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--|
| 2D                          | 100                             | 3.45                     | 930 min / 15 horas y 30 minutos  |
| 1D                          | 100                             | 3.86                     | 958 min / 15 horas y 58 minutos  |
| 1D/2D                       | 100                             | 3.68                     | 994 min / 16 horas y 34 minutos  |
| 2D                          | 10                              | 1.38                     | 1098 min / 18 horas y 18 minutos   |
| 1D                          | 10                              | 1.21                     | 1108 min /18 horas y 28 minutos  |
| 1D/2D                       | 10                              | 1.75                     | 928 min / 15 horas y 28 minutos  |

Tabla 11. Calados máximos en el punto 3

Para un tiempo de retorno de  $T=100$  años, se alcanzarán unos niveles de agua de 3.86 metros. En este punto seguimos con el patrón de los puntos anteriores. El mayor nivel de agua lo proporciona la simulación 1D y los menores la simulación 2D. En este caso la reducción entre ambos modelos es de un 11% por lo que, según estos tres puntos vistos, a medida que nos acercamos al cauce del río, los resultados son más similares entre los diferentes modelos. El modelo 1D/2D tiene un comportamiento coherente y similar al de resto de modelos, por lo que para  $T=100$  años, esta estructura lateral utilizada como condición de contorno, no tiene ninguna influencia sobre los resultados.

Para  $T=10$  años se aprecia un comportamiento totalmente diferente. El valor del calado máximo es mayor para el modelo 2D que para el modelo 1D. Además, el modelo 1D/2D arroja unos resultados mucho más elevados que los otros dos modelos. Por lo tanto, se podría decir que para caudales menores sí que existe una influencia de esta estructura lateral en los resultados de calados máximos para este modelo. Esto podría ser debido a que la estructura lateral ha de tener una cota mayor a la del terreno para que Hec-Ras funcione, por lo que se está estableciendo una barrera que eleva la cota del terreno que realmente existe y que hace variar los resultados. Para volúmenes elevados de agua esta condición no genera problemas, pero para valores menores de agua sí que puede interferir en los resultados. Así pues, las zonas cercanas a la estructura lateral sería más aconsejable estudiarla mediante un modelo 2D o 1D.

De igual manera que en los otros puntos, se puede ver la sección transversal y sus niveles de agua para el caso de la simulación 1D en la sección donde se ubica el punto estudiado.

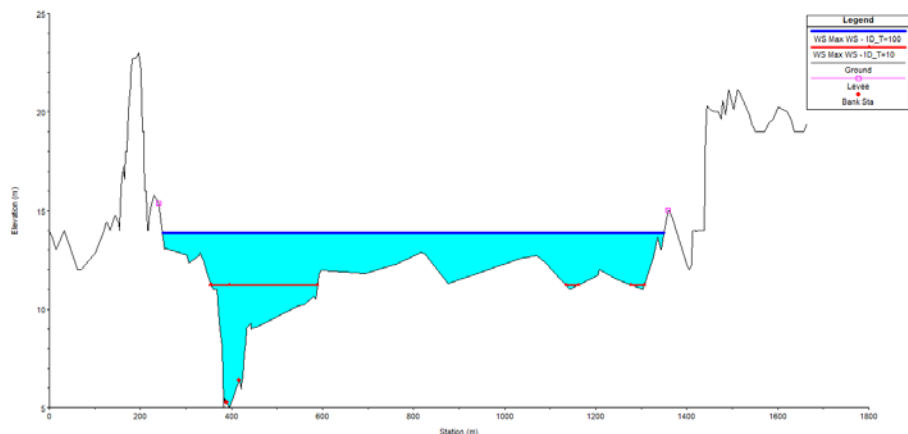


Figura 64. Niveles de agua en la sección 3752.607

#### 5.2.4. Punto 4- Sección 3445.51

En este último punto, se analiza un punto que se encuentra localizado en el centro del cauce del río. Esta es una de las zonas donde hay una mayor profundidad del lecho del río y por lo tanto los niveles de agua en este punto son muy elevados. A continuación, se pueden ver los valores del nivel de agua para cada tipo de modelización.

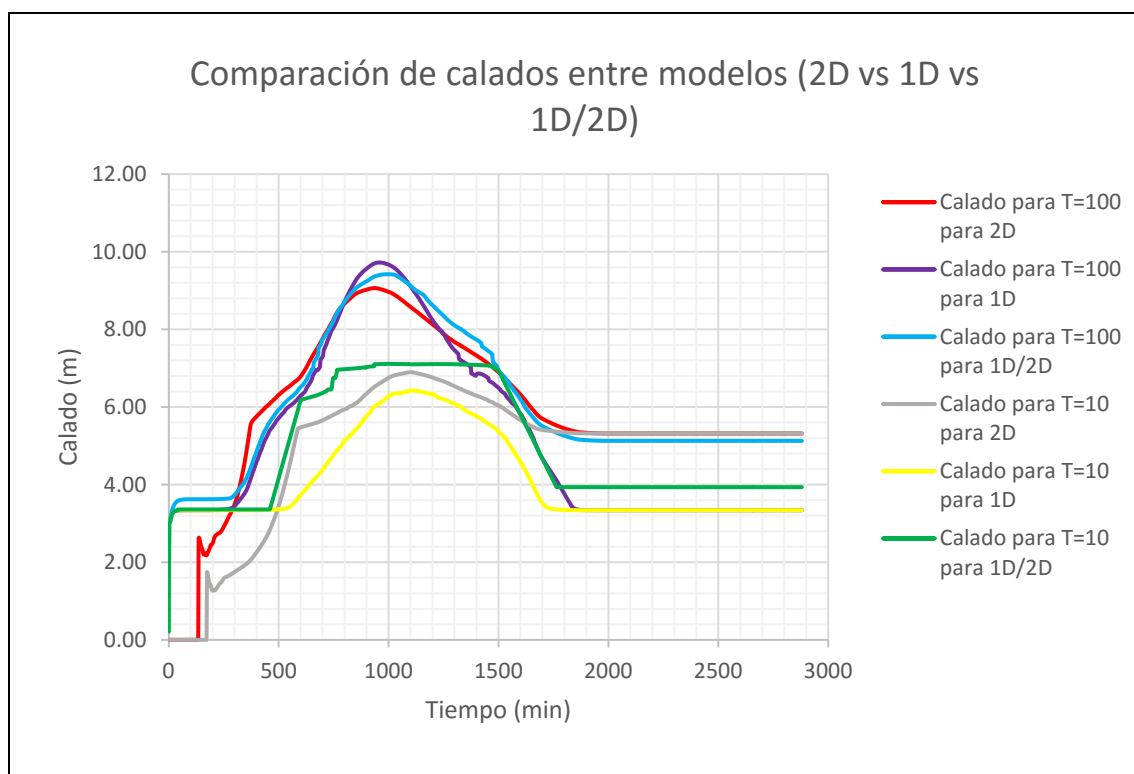


Figura 65. Calados en el punto 4 para los 6 modelos

| Tipo de modelización | Tiempo de retorno (años) | Calado máximo (m) | Incremento de tiempo, después del inicio de la simulación ,en el que se produce el máximo |
|----------------------|--------------------------|-------------------|---|
| 2D                   | 100                      | 9.06              | 934 min / 15 horas y 34 minutos   |
| 1D                   | 100                      | 9.72              | 958 min / 15 horas y 58 minutos   |
| 1D/2D                | 100                      | 9.42              | 996 min / 16 horas y 36 minutos   |
| 2D                   | 10                       | 6.90              | 1098 min / 18 horas y 18 minutos  |
| 1D                   | 10                       | 6.42              | 1110 min /18 horas y 30 minutos   |
| 1D/2D                | 10                       | 7.11              | 986 min / 16 horas y 26 minutos   |

Tabla 12. Calados máximos en el punto 4

Tal y como se ha comentado, los niveles de agua para este punto son más elevados que en los apartados anteriores. Para un tiempo de retorno de  $T=100$  años se tienen un nivel de agua de 9.72 metros y para  $T=10$  años de 7.11 metros.

En este punto las diferencias de calados entre los diferentes tiempos de retorno son menores. Esto puede ser debido a que la zona del cauce del río está más encajonada, ya que es más profunda. Así pues, cuando viene la avenida de  $T=10$  años, toda el agua circula únicamente por el cauce ya que éste es muy profundo y no permite que el agua se expanda por la planicie de inundación y por lo tanto los calados son muy elevados, aunque no haya grandes caudales. Para  $T=100$  años, este cauce profundo se seguirá llenando, pero también rebosará por la planicie de inundación, pero como esta zona es más extensa los calados no se elevarán tanto en estas zonas y los mayores y más significativos se producirán en el centro del río.

Finalmente, destacar que, para este último punto de control, para  $T=100$  años, el modelo 1D también es el que proporciona los resultados más altos. El modelo 2D presenta una reducción del 7%. Así pues, el patrón que se sigue en estos cuatro puntos que se han analizado, pero que no implica que se cumplan en todos los puntos restantes de todo el modelo, es que cuanto más cerca del cauce se está, la diferencia entre los resultados de los diferentes modelos es menor y éstos se asemejan más.

En la *Figura 66* se puede ver la sección transversal y los niveles de agua que se alcanzan en la simulación 1D en la sección donde se localiza el punto 4.

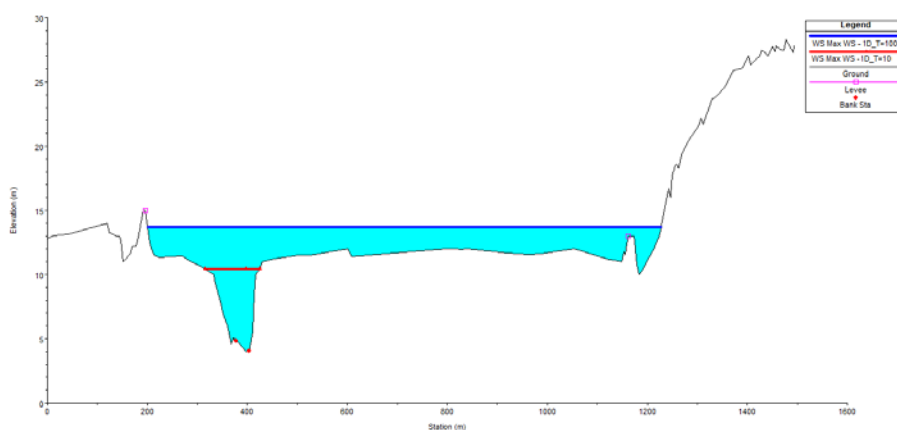


Figura 66. Niveles de agua en la sección 3445.51

### 5.3. Zonas con carácter más urbano inundadas

Finalmente, durante el desarrollo de los análisis de resultados se ha podido ver que existen una serie de zonas, con un carácter más urbano, que acorde a los modelos y los resultados que se han obtenido, se inundan. Estas zonas sería necesario analizarlas con más detalla. No ha existido ningún elemento a lo largo del desarrollo de los modelos que lleve a pensar que los resultados puedan ser incorrectos. Además, estos resultados están en consonancia con los modelos y estudios desarrollados por *L'Agència Catalana de l'Aigua*, cuya mancha de inundación para la zona es similar a la que se ha encontrado en este trabajo. Así pues, se quiere comprender qué está sucediendo en estas zonas.

A continuación, se analizarán estos resultados en función del modelo 2D, ya que es el modelo con mayor precisión acorde a los resultados expuestos, y se tratará de dar una explicación lógica de lo qué está sucediendo en estas zonas y qué medidas se podrían aplicar, en caso que sean necesarias, para mitigar estos efectos. Este análisis se ha realizado para un tiempo de retorno de  $T=100$  años, que es el que se considera una avenida de inundación. La siguiente figura muestra las zonas, con un carácter más urbano donde se ubican los puntos que se inundan.

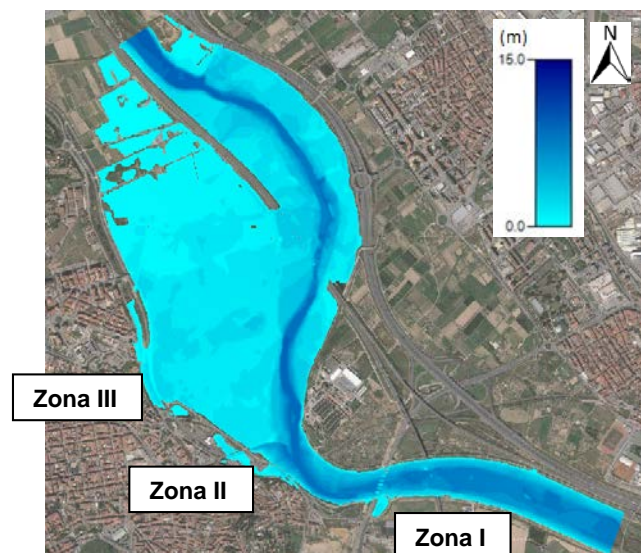


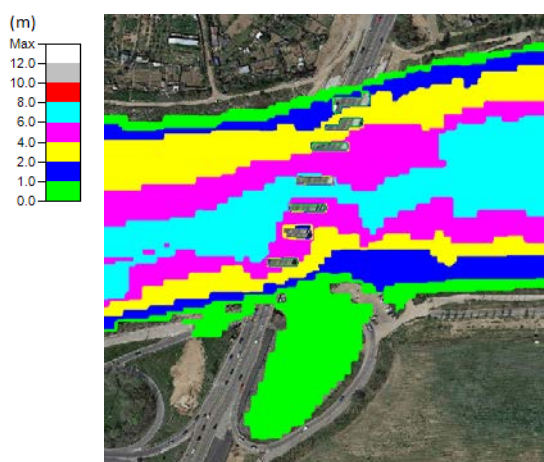
Figura 67. Calado máximo de para el MDT ( $T=100$  años)



### 5.3.1. Zona inundada I



*Calados para  $T=100$  años*



*Velocidades para  $T=100$  años*

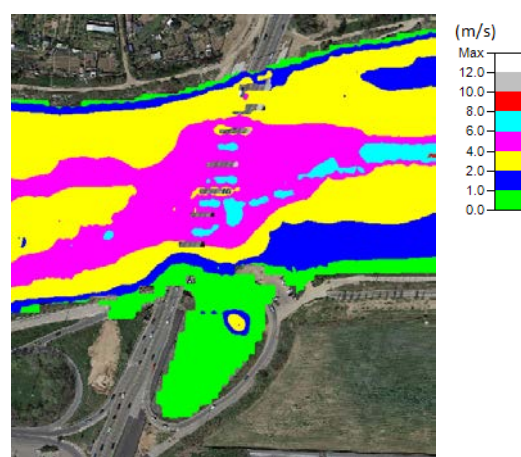


Figura 68. Mapa de calados y velocidades para la zona inundada I ( $T=100$  años)

Esta zona está ubicada cerca del puente de la carretera C-245. Este flujo de agua escapa de la zona por un punto bajo que existe entre dos diques, es decir, el dique rompe su continuidad ya que es una zona de transición entre un dique de hormigón y una zona con una mota de tierra. Esto hecho permite que el agua pase por el hueco de las protecciones que existen e inunde una zona baja que queda entre dos carreteras. Este punto tiene un calado muy bajo de agua, con niveles de agua menores a 1 metro, por lo que no presenta peligrosidad, según el criterio de los calados. Con respecto a las velocidades, se ve que la velocidad también es muy baja, exceptuando una zona más profunda y donde se generan unas velocidades mayores a 1m/s. Esta zona de velocidades mayores a 1m/s es una zona peligrosa. Sin embargo, esta zona no es muy accesible al público, ni hay edificios, por lo que no presenta riesgo.

### 5.3.2. Zona inundada II

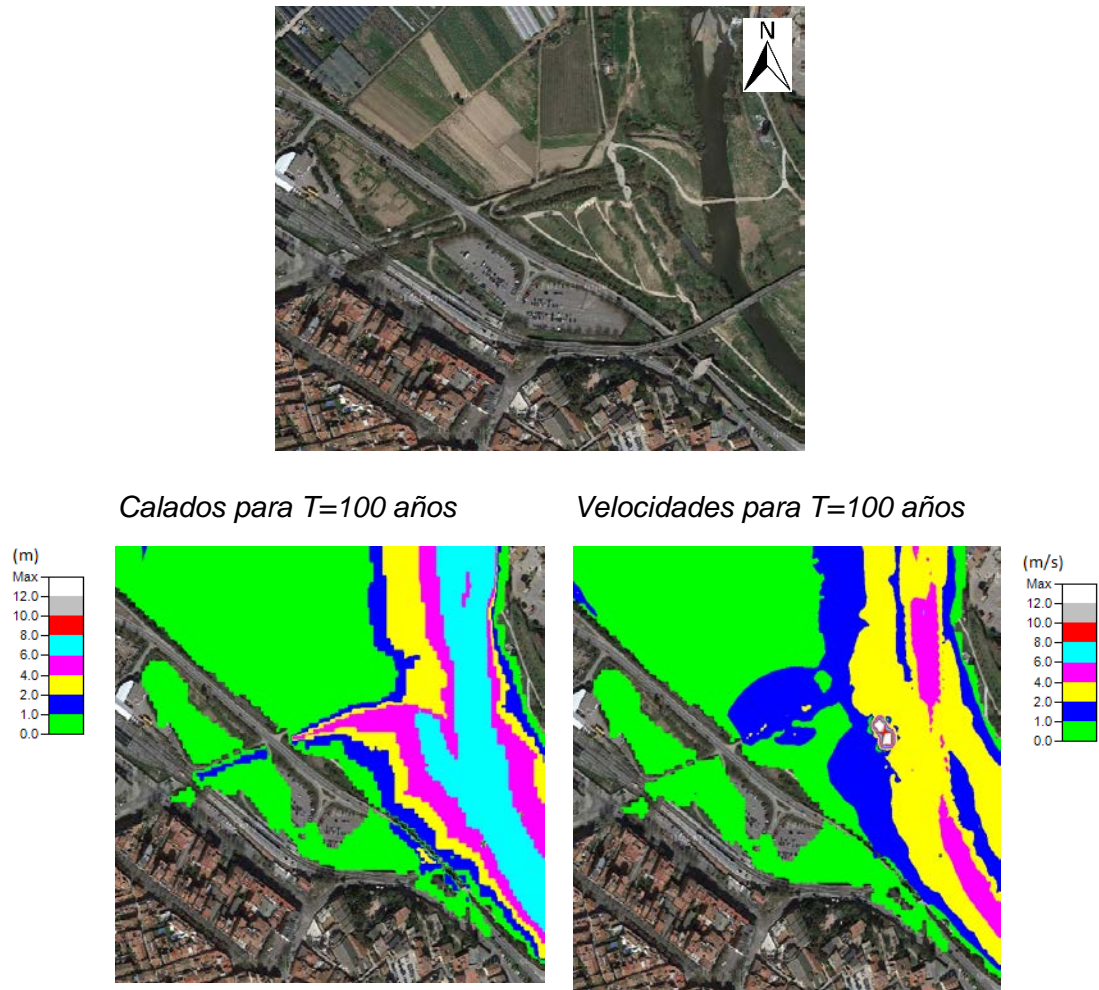


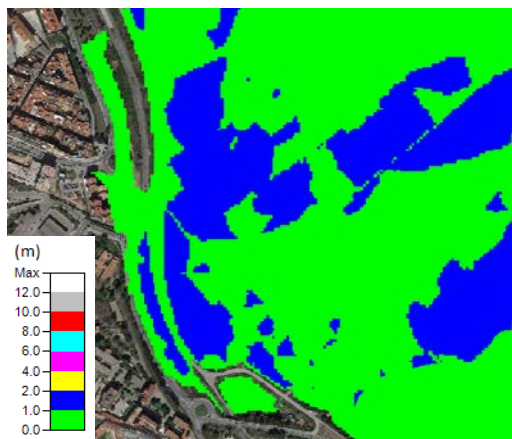
Figura 69. Mapa de calados y velocidades para la zona inundada II ( $T=100$  años)

Esta segunda zona, está ubicada cerca de la estación de ferrocarril de *Sant Boi de Llobregat*. Según los resultados obtenidos, el agua también pasa por encima de los diques que protegen esta zona e inundan parte del parking de la estación. Acorde a los mapas de peligrosidad desarrollados, los calados de agua son menores a 1 metros para la zona relativa al parquin de la estación de ferrocarril, exceptuando una zona donde hay una depresión del terreno y en dicha zona los calados son mayores de 1 metro. Las velocidades tampoco son mayores a 1 m/s. Por lo tanto, las zonas donde se satisfacen estas dos condiciones, no son zonas peligrosas. Sin embargo, convendría estudiar más en profundidad esta zona ya que puede haber coches y se pueden producir elevados daños materiales. Convendría analizar si es necesario modificar las defensas de la zona para proteger el parquin de la estación mejor.

### 5.3.3. Zona inundada III



*Calados para T=100 años*



*Velocidades para T=100 años*

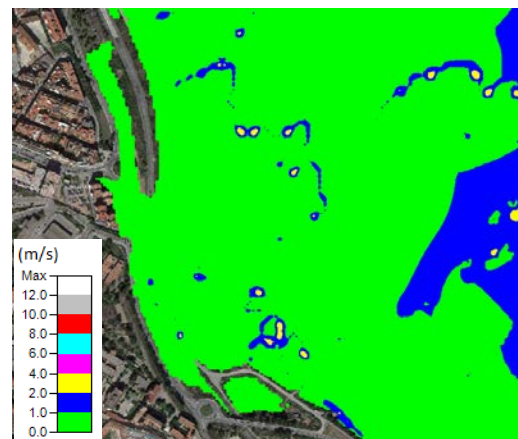


Figura 70. Mapa de calados y velocidades para la zona inundada III (T=100 años)

Finalmente, en esta última zona, el agua también cruza parte de la carretera e inunda alguna de las zonas colindantes. Esta zona no dispone de diques que protejan la zona de detrás de la carretera que se inunda. Además, existe un punto bajo en esta zona que permite superar al agua la carretera. Tal y como se puede ver en los planos de peligrosidad, las velocidades son muy bajas por lo que no hay peligro según el criterio de velocidades. Según el criterio de calados, hay zonas donde el nivel supera el metro (zonas azules), por lo que si se considerarían zonas peligrosas. Así pues, sería conveniente desarrollar alguna medida adicional de protección para mitigar los posibles efectos adversos que puede provocar la crecida del río Llobregat para un tiempo de retorno de T=100 años.

## 6. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo ha permitido analizar y estudiar tres grandes áreas sobre las cuales se han obtenido una serie de conclusiones:

Conclusiones asociadas al uso del nuevo software Hec-Ras 5.0:

- Después de trabajar con Hec-Ras se ha comprobado que se trata de una herramienta informática muy potente con la que se pueden realizar complejas simulaciones bidimensionales y que probablemente su uso se hará muy popular debido a la buena fama internacional que tienen las versiones 1D de este software y al hecho que es un software de descarga libre.
- La incorporación de la nueva ventana Ras Mapper permite una visualización muy sencilla de los resultados. Además, dispone de una interfaz muy amigable que resulta muy amigable e intuitiva para el usuario.
- Es necesario desarrollar mejoras y actualizaciones en el programa, especialmente para conseguir una mayor flexibilidad para realizar la modificación de la geometría, ya que en la versión actual es muy complejo y, por ejemplo, no se permite la creación de estructuras hidráulicas dentro de la zona 2D. Esta rigidez provoca que sea necesario un laborioso trabajo previo en algún programa SIG como por ejemplo ArcGis.
- La determinación del Intervalo de tiempo de simulación es un elemento clave para el correcto funcionamiento de Hec-Ras, por lo que se ha de dedicar mucho tiempo e invertir gran cantidad de recursos en ajustar correctamente estos parámetros, ya que de ello depende que el modelo sea estable y que se satisfagan las condiciones de Courant.

Conclusiones relativas al desarrollo de estudios de inundación:

- Para cualquier estudio de inundaciones es necesario disponer de una gran cantidad de información topográfica de gran precisión. En la actualidad es posible obtener modelos digitales del terreno (MDT) de gran calidad de manera gratuita. Sin embargo, para la obtención de unos resultados, que se ajusten a la realidad vigente, es imprescindible realizar un tratamiento y una adecuación de dicha información. Muchas veces estos MDT no son actuales y no reflejan algunas de las estructuras que hay en la zona. Este tratamiento y modificación de la información puede ser una parte muy larga y tediosa del desarrollo del estudio de inundación. Sin embargo, realizar este paso correctamente asegura unos buenos resultados. Por muy complejo que sea el modelo hidráulico, si la información de entrada que proporcionamos al programa es de baja calidad, el resultado será también de baja calidad.

Conclusiones relativas a los diferentes tipos de modelos:

- El modelo bidimensional (2D) es el más preciso, pero tiene el gran problema que es necesario mucho tiempo de cálculo cuando se tienen mallas grandes que contengan muchas celdas. No obstante, después de analizar los diferentes resultados de este modelo respecto a los otros modelos, se puede establecer que para zonas planas

es más recomendable desarrollar un modelo bidimensional, a pesar de que el tiempo de ejecución es mayor, ya que los resultados se ajustaran más a la realidad.

- El modelo unidimensional es el modelo más sencillo de desarrollar y es muy fácil conseguir unos resultados estables. Además, sus bajos tiempos de ejecución del cálculo, agilizan el estudio y la obtención de resultados. Esta metodología, tiene un buen comportamiento en las zonas del cauce del río, pero falla más a medida que nos alejamos del centro del río.
- El modelo cuasi 2D (1D/2D), funcionalidad muy novedosa de esta versión Hec-Ras 5.0, resulta ser un modelo muy difícil de manejar, en el cual es muy complicado conseguir que los cálculos sean estables y que el modelo funcione correctamente. Este problema es debido, principalmente, al elemento de conexión, el cual complica mucho el desarrollo del modelo.
- La determinación de un patrón de comportamiento entre los modelos (1D, 1D/2D y 2D), es decir, establecer si siempre los valores del modelo 1D son mayores o menores que los del modelo 2D es algo muy complejo. Para conocer este comportamiento y concluir si existe un patrón, sería necesario realizar otro trabajo cuyo objetivo fuese analizar para diferentes localizaciones y para diversos calados si se repite un patrón de comportamiento. Para los 4 puntos que se han analizado en este trabajo, se ha comprobado que cuanto más alejado se está del cauce del río, la diferencias entre modelos son mayores. En los puntos más alejados las diferencias han sido de aproximadamente un 20% y a medida que nos acercábamos a la zona central del río, las diferencias se han reducido hasta el 10%. Con estos resultados, se propone un trabajo futuro que consiste en la comprobación y la verificación de la conducta de estos 4 puntos analizados.

Finalmente, como conclusión personal, este trabajo ha permitido aplicar todos los conocimientos teóricos desarrollados durante los estudios en el campo de la hidráulica y la ingeniería civil, permitiendo profundizar más en los modelos hidráulicos, cuyo desarrollo supone un continuo reto tanto en la actualidad como en el futuro. Este trabajo ha ayudado a consolidar muchos de los conocimientos previos que se tenían y adquirir otros nuevos que serán de gran utilidad en el ámbito profesional.



## Referencias

- [1] Institut Cartogràfic de Catalunya, «Pàgina oficial del ICC» [En línea]. Disponible: [www.icc.cat](http://www.icc.cat). [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [2] L. Timbe Castro y P. Willems, «Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones» *MASKANA*, vol. 2, nº 1, 2011.
- [3] «Biblioteca de la Universidad de Piura» [En línea]. Disponible: [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_123\\_183\\_81\\_1150.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf). [Último acceso: 01 Septiembre 2016].
- [4] B. Jordán de Urries, «Iglobale-Training & e-learning» [En línea]. Disponible: <https://iglobale.wordpress.com/2015/03/15/iber-potente-software-libre-de-modelado-hidraulico-bidimensional/>. [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [5] Ministerio de fomento del Gobierno de España, «Centro de Estudios y experimentación de obras públicas» [En línea]. Disponible: <http://ceh-flumen64.cedex.es/IngSis/mike-11.htm>. [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [6] TUFLOW, «TUFLOW official website» [En línea]. Disponible: [www.tuflow.com/About.aspx](http://www.tuflow.com/About.aspx). [Último acceso: 22 Marzo 2016].
- [7] C. Goodell, «Hec-Ras model Blog» [En línea]. Disponible: [http://hecrasmodel.blogspot.com.es/2016\\_03\\_01\\_archive.html](http://hecrasmodel.blogspot.com.es/2016_03_01_archive.html). [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [8] US Army Corps of Engineers, «Hydrology Engineering Center» [En línea]. Disponible: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx>. [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [9] R. Benayas, «TYC GIS» [En línea]. Disponible: <http://www.cursosgis.com/index.php/blog-cursosgis/95-que-es-hec-ras-y-para-que-sirve.html>. [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [10] Academia IngNova, «Academia IngNova» [En línea]. Disponible: <https://academia.ingnova.es/cursos-online/hidraulica-e-hidrologia/hec-ras-5-0>. [Último acceso: 5 Abril 2016].
- [11] G. W. Brunner, «Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS» Octubre 2014. [En línea]. Disponible: [www.hec.usace.army.mil/misc/files/ras/Combined\\_1D\\_and\\_2D\\_Modeling\\_with\\_HEC-RAS.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/misc/files/ras/Combined_1D_and_2D_Modeling_with_HEC-RAS.pdf). [Último acceso: 1 Febrero 2016].
- [12] M. L. M. Santaengracia, «Técnicas y algoritmos empleados en estudios hidrológicos e hidráulicos» Montevideo, 2010.
- [13] C. Goodell, «The Ras Solution» Enero 2010. [En línea]. Disponible: <http://hecrasmodel.blogspot.com.es/2010/01/downstream-boundary-normal-depth.html>. [Último acceso: 1 Septiembre 2016].



- [14] Agència Catalana de l'aigua, «Model hidràulic del Baix Llobregat –tram comprés entre la confluència de la riera de Rubí i desembocadura» 2010.
- [15] V. T. Chow, Hidráulica de Canales Abiertos, 1994.
- [16] Agència Catalana d'Aigua, «Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local» 2003.
- [17] C. T. Ackerman, «US Army Corps of Engineers» Septiembre 2009. [En línea]. Disponible: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/documentation/HEC-GeoRAS42\\_UsersManual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/documentation/HEC-GeoRAS42_UsersManual.pdf). [Último acceso: 1 Septiembre 2016].
- [18] Agència Catalana de l'Aigua, «Consulta de dades de l'aigua i el medi» [En línea]. Disponible: <http://aca-web.gencat.cat/recursos/sig/public/VisorPEF.html>. [Último acceso: 21 Junio 2016].
- [19] Real decreto 9/2008 del 11 de enero, «Boletín Oficial del Estado Español» 16 Enero 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/boe/dias/2008/01/16/pdfs/A03141-03149.pdf>. [Último acceso: 1 Septiembre 2016].

## **Anexo I: Planos de ubicación**

Este anexo se encuentra en un fichero adjunto.

## **Anexo II: Álbum fotográfico de la zona de estudio**

Este anexo se encuentra en un fichero adjunto.